

Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Wesam Kaddar
aus
Syrien-Latakia

Referent: Prof. Dr.-Ing Gerd Witt
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Köhler

Tag der mündlichen Prüfung: 17. November 2010

Vorwort

Die Vollendung einer Doktorarbeit stellt einen besonderen Moment im Leben dar. So möchte auch ich diesen Anlass nutzen, um all denjenigen Menschen zu danken, die mich gefördert, motiviert und unterstützt haben.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand beim Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt am Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen.

Mein Besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt für die Anregung zu dieser Arbeit und für die intensive wissenschaftliche Betreuung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Köhler danke ich ebenfalls für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Mein Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für die Fertigungstechnik, die zum Gelingen dieser Arbeit beitragen haben.

Ferner bedanke ich mich bei den ehemaligen Studien- und Diplomarbeitern, die ihren Beitrag zu diesem Werk geleistet haben. Namentlich sind hier Jens Gronau, Alexander Dodik, Marcel Barkow, Nils Klappert, Abdulaziz Kaya, Nils Klöther, Ingo Ehlers zu nennen.

Schließlich gilt mein herzlicher persönlicher Dank all denjenigen Personen, die während dieser Zeit sehr viel auf mich verzichten mussten, mich aber trotzdem liebevoll unterstützen, insbesondere meine Familie und Freunde, die immer für mich trotz der großen geografischen Entfernung da waren. Ihr sei diese Arbeit gewidmet.

Duisburg, im Mai 2010

Wesam Kaddar

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	VI
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK UND ZIELSETZUNG	4
2.1 LASER-SINTERN	4
2.2 DAS GRUNDPRINZIP DES SCHICHTWEISEN AUFBAUS:	5
2.3 ZIELSETZUNG UND AUFGABESTELLUNG:	6
3 EINFLUSSGRÖßEN BEIM LASER-SINTERN VON KUNSTSTOFF	9
3.1 PROZESSEIGENSCHAFTEN	10
3.1.1 <i>Energiequelle – Der Laser</i>	10
3.1.1.1 Laserleistungen:	10
3.1.1.2 Wellenlänge	11
3.1.1.3 Strahldurchmesser	12
3.1.2 <i>Belichtung</i>	13
3.1.2.1 Scangeschwindigkeit	14
3.1.2.2 Scanlinienabstand	14
3.1.2.3 Spurbreitenkompensation	14
3.1.3 <i>Umgebung</i>	16
3.1.3.1 Schutzgas	16
3.1.3.2 Vorwärmtemperatur	17
3.1.4 <i>Bauteil</i>	20
3.1.4.1 STL-Formatierung	20
3.1.4.2 Geometrie	23
3.1.4.3 Abmessung	24
3.1.4.4 Skalierung	25
3.1.4.5 Schichtdicke:	26
3.1.4.6 Platzierung im Bauraum	30
3.2 MATERIALEIGENSCHAFTEN	32
3.2.1 <i>Thermische Eigenschaften</i>	32
3.2.1.1 Wärmeleitfähigkeit	32
3.2.1.2 Wärmekapazität	34
3.2.2 <i>Optische Eigenschaften</i>	34
3.2.3 <i>Pulvermaterial</i>	36
3.2.3.1 Pulverauftrag	36
3.2.3.2 Pulverzustand	37
3.2.3.3 Korngröße	39
3.3 DIE ANLAGE	40
3.3.1 <i>DTM Sinterstation® 2000 / 2500</i>	40
3.3.2 <i>Aufbau</i>	40
3.3.3 <i>Einsetzbare Werkstoffe</i>	41
4 SCANSTRATEGIEN BEIM LASERSINTERN VON KUNSTSTOFF	43
4.1 PARALLEL-STRATEGIE	45
4.2 KREUZ-STRATEGIE	46
4.3 FÜLLTYPEN	47
4.4 SORTED FILL	48
4.5 ROTATE SCAN ORDER	49

5	DIE EINFLÜSSE VERSCHIEDENER PROZESSPARAMETER AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN DER BAUTEILE	51
5.1	ZUGVERSUCHE NACH DIN EN ISO 527-1	51
5.1.1	<i>Charakteristische Größen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens im Zugversuch</i>	<i>52</i>
5.2	DIE FESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BELICHTUNGSSTRATEGIE	54
5.3	DIE FESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON FILL LASER SCAN COUNT, FILL LASER POWER UND OUTLINE LASER SCAN COUNT	58
5.4	DIE FESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VOM LINIENABSTAND	62
5.5	DIE FESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SCANGESCHWINDIGKEIT	67
5.6	DIE FESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SCHICHTDICKE	70
5.7	DIE ENERGIEDICHTE E_M BEIM LASER-SINTERN	73
5.8	VARIATION DES LINIENABSTANDES BEI KONstanTER ENERGIEDICHTE	77
5.9	VARIATION DER SCANGESCHWINDIGKEIT BEI KONstanTER ENERGIEDICHTE	80
5.10	VARIATION DER SCHICHTDICKE BEI KONstanTER ENERGIEDICHTE	83
5.11	DIE EINFLUSSHÖHE DER HAUPTPROZESSPARAMETER AUF DIE ZUGFESTIGKEIT	85
6	DIE EINFLÜSSE VERSCHIEDENER PROZESSPARAMETER AUF DIE OPTISCHEN EIGENSCHAFTEN DER LS-BAUTEILE	88
6.1	MESSUNG UND AUSWERTUNG VON TECHNISCHEN OBERFLÄCHEN	88
6.1.1	<i>Begriffsklärung.....</i>	<i>88</i>
6.1.2	<i>Messstrecken und Rauheitskennwerte</i>	<i>90</i>
6.1.2.1	Messstrecken.....	90
6.1.2.2	Kennwerte:.....	90
6.2	DIE OBERFLÄCHENRAUHEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN PROZESSPARAMETERN.....	92
6.2.1	<i>Wirkung der Outline-Funktion auf die Oberflächenrauheit.....</i>	<i>94</i>
6.2.2	<i>Wirkung der Schichtdicke auf die Oberflächenrauheit</i>	<i>97</i>
7	DIE NACHBEARBEITUNGSMÖGLICHKEIT BEIM LS VON THERMOPLASTEN.....	100
7.1	AUSGANGSSITUATION:.....	100
7.1.1	<i>Prüfkörper und Prüfflächen.....</i>	<i>100</i>
7.1.2	<i>Untersuchung der Ausgangssituation:</i>	<i>101</i>
7.2	VERFAHREN DER OBERFLÄCHENTECHNIK.....	103
7.2.1	<i>Strahlen</i>	<i>104</i>
7.2.1.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	105
7.2.1.2	Auswertung und Diskussion.....	105
7.2.2	<i>Fräsen.....</i>	<i>107</i>
7.2.2.1	Verfahren	107
7.2.2.2	Auswertung und Diskussion.....	107
7.2.3	<i>Gleitschleifen</i>	<i>109</i>
7.2.3.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	110
7.2.3.2	Auswertung und Diskussion.....	111
7.2.4	<i>Infiltrieren.....</i>	<i>117</i>
7.2.4.1	Verfahren	117
7.2.4.2	Auswertung und Diskussion.....	117
7.2.5	<i>Lackieren.....</i>	<i>119</i>
7.2.5.1	Verfahren	119
7.2.5.2	Auswertung und Diskussion.....	120
7.3	ANDERE MÖGLICHKEITEN ZUR OBERFLÄCHENBEARBEITUNG: (DAS METALLISIEREN)	122
8	ZUSAMMENFASSUNG	125
9	ANHANG: E-MODULE- & BRUCHDEHNUNGSDIAGRAMME VOM KAPITEL 5	129
	ABBILDUNG 9-1: ELASTIZITÄT IN ABHÄNGIGKEIT VON SCANSTRATEGIEN.....	129
	ABBILDUNG 9-2: BRUCHDEHNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON SCANSTRATEGIEN.....	129

ABBILDUNG 9-3: BRUCHDEHNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VOM LINIENABSTAND	130
ABBILDUNG 9-4: ELASTIZITÄT IN ABHÄNGIGKEIT VON H_s BEI KONSTANTER E_F	130
ABBILDUNG 9-6: ELASTIZITÄT IN ABHÄNGIGKEIT VON V_s BEI KONSTANTER E_F	131
ABBILDUNG 9-7: DIE BRUCHDEHNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VOM V_s	131
ABBILDUNG 9-8: BRUCHDEHNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VOM V_s BEI KONSTANTER E_F	132
ABBILDUNG 9-9: ELASTIZITÄT IN ABHÄNGIGKEIT VON D_s BEI KONSTANTER E_V	132
ABBILDUNG 9-10: BRUCHDEHNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON D_s BEI KONSTANTER E_F	133
LITERATURVERZEICHNIS	134
LEBENS LAUF	139

Abkürzungen und Formelzeichen

a	Pulverschicht-Füllfaktor	-
A	Absorptionsgrad	-
a _p	Schnitttiefe beim Fräsen	mm
B	Schichtbreite	mm
CLI (SLC)	Common Layer Interface	-
c _p	Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)	J/g.K
CT	Computertomographie	-
d _k	Pulver-Korngröße	µm
d _L	Durchmesser des Laserstrahls	mm
d _{MJ}	Distanz des (Sorted Fill) Max Jump	mm
D _S	Schichtdicke	mm
E	Elastitätsmodul	N/mm ²
E _A	Flächenenergie	J
E _F	Energiedichte pro Flächeneinheit	J/mm ²
E _S	Streckenenergiedichte	J/mm
E _{s,f}	Streckenenergie vom Fülllaser	J/mm
E _{s,o}	Streckenenergie vom Outline	J/mm
E _{th}	Die benötigte thermische Energie beim LS	J
E _v	Energiedichte pro Volumeneinheit	J/mm ³
h _S	Scanlinienabstand	mm
l _e	Einzelmessstrecke	mm
LLM	Layer Laminate Manufacturing	-
l _m	Gesamtmessstrecke	mm
l _n	Nachlaufstrecke	mm
LS	Laser-Sintern	-
l _t	Gesamttaststrecke	mm
l _v	Vorlaufstrecke	mm
L _x	Scanlänge in X-Richtung	mm
L _y	Scanlänge in Y -Richtung	mm
m	Masse	g
Me ^{z+}	Metallion mit z-fach positiver Ladung	-

MRT	Magnetresonanztomographie	-
n	Oxidationszahl	-
N	Belichtungsanzahl	-
Nd:YAG	Neodym-dotierten YAG-Kristall	-
Ø	Durchmesser	mm, cm
PA12	Polyamide 12	-
P _{abs}	Die absorbierte Laserleistung	W
P _f	Laserleistung von Fill-Laser	W
P _L	Laserleistung	W
P _O	Laserleistung von Outline-Laser	W
R	Reflexionsgrad	-
R _a	Mittenrauheit	µm
R _e	Streckgrenze	N/mm ²
Re ⁿ⁺	Reduktionsmittel	-
R _m	Maximale Zugfestigkeit	N/mm ²
R _{max}	Maximale Rauheit	µm
RP	Rapid Prototyping	-
R _z	Gemittelte Rautiefe	µm
SLS	Selective Laser Sintering	-
STL	Standard Triangulation Language	-
T	Transmissionsgrad	-
t _{ges}	Gesamtsinterzeit einer Schicht	s
T _m	Schmelztemperatur	°C
T _u	Umgebungstemperatur	°C
T _v	Vorwärmtemperatur	°C
t _x	Abkühlzeit für X-Probe	s
t _y	Abkühlzeit für Y-Probe	s
V	Materialvolumen	mm ³
V _O	Konturgeschwindigkeit	mm/s
V _S	Scangeschwindigkeit	mm/s, m/s
V _z	Zuggeschwindigkeit	mm/min
W ₀	Radius des Laserstrahls	mm
x, y, z	Ortskoordinate	mm
Z	Bauhöhe	mm

α_B	Brewsterwinkel	°
Δ	Differenz	-
ΔQ	Wärmemenge	J
$\Delta x, \Delta Y, \Delta Z$	Schrumpfungsbeträge in X, Y, Z Richtung	mm
ε	Dehnung in %	-
ε	Abweichungsfehler von Sollkontur	mm
ζ	Einwirkzeit des Lasers	s
λ	Wellenlänge	μm
λ_F	Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Fluids	W/mK
λ_P	Wärmeleitfähigkeit des Pulvers	W/mK
λ_t	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
ρ	Materialdichte	g/mm^3
σ	Spannung	N/mm^2
σ_{mech}	mechanische Spannung	N/mm^2
ψ	Schüttungsporösität	-

1 Einleitung

Die Zeit von der Idee bis zum fertigen Produkt, also die „time to market“, ist heutzutage zum entscheidenden Faktor für den finanziellen Erfolg des Produktes geworden. So ist es häufig wirtschaftlich vernünftig, das geplante Entwicklungsbudget zu überschreiten oder höhere Produktionskosten hinzunehmen als das Produkt verspätet anbieten zu können. Um diese Erkenntnisse umzusetzen, wurde in den 80er Jahren begonnen, traditionelle Konzepte der Produktentwicklung zu überdenken und Neue zu erarbeiten, um bei mindestens konstanter Qualität, die Entwicklungszeiten und Herstellungskosten zu senken sowie die eigene Produktivität und Flexibilität zu steigern [1] [2] [3]. Im Verlauf der Restrukturierung des Produktentwicklungsprozesses wurden auch die ersten Fertigungsverfahren zur Herstellung von Prototypen nach den Verfahren des Rapid Prototyping entwickelt, da man besonders im ohnehin großen Zeitraum des Prototypenbaus und deren Erprobung ein großes Potential für Zeiterparnis erwartete.

Der Begriff Rapid Prototyping, frei übersetzt „Schnelle Prototypenfertigung“ oder „Schnelle Modellherstellung“, beschreibt demnach eine, im Vergleich zu traditionellen Modellbauverfahren, schnelle Methode zur Herstellung von Prototypen oder Modellen unter Zuhilfenahme von CAD-Daten. Sie erlaubt also eine wesentlich beschleunigte Überprüfung der Konstruktion und die möglicherweise notwendige Korrektur des Designs. Änderungen von einmal festgelegten Konstruktionen sind besonders kritisch, da die meisten Produkte komplex aufgebaut sind und eine Änderung häufig andere unumgänglich macht [4]. Je später so etwas im Produktentwicklungsprozess notwendig ist, desto höher sind die daraus resultierenden Kosten, da diese mit dem Grad der Produktentwicklung exponentiell ansteigen und zeitlich wesentlich aufwändiger werden. Prominente Beispiele für entsprechende Kosten liefern Automobilhersteller, von Zeit zu Zeit, durch kostenintensive und prestigeschädigende Rückrufaktionen.

Ein weiterer, vielleicht ein wenig trivial erscheinender, aber dennoch nicht zu verachtender Vorteil des Rapid Prototyping ist die Motivation, die von einem physischen Modell ausgehen kann. Traditionell wird versucht, die langwierige Herstellung von Modellen, in der ohnehin zeitlich sehr stark begrenzten Produktentwicklungsphase, zu vermeiden. Heute und dank der Rapid Prototyping Technologie steht schon in ei-

ner frühen Phase ein physisches Modell zur Verfügung, so lassen sich wie oben beschrieben, nicht nur Fehler finden, sondern die Realisierung der Idee rückt ein Stück näher an den Einzelnen heran, der so „seinen/ihren Anteil“ am Projekt verwirklicht sieht. Ebenso lässt sich so die Evolution eines Produkts in verschiedenen Phasen beobachten, was bei Entwicklern innere Befriedigung und somit neue Motivation in Bezug auf das gesamte Projekt erzeugt. Eine solche Überlegung, die die Motivation der Mitarbeiter miteinbezieht, ist, wie beispielsweise die frühe Fehlererkennung, ebenso ein Zeichen der Restrukturierung und des Umdenkens in Bezug auf den traditionellen Produktentwicklungsprozess [1].

Die Rapid Technologien haben sich nicht nur im Modellbau zur Herstellung von Prototypen (Konzeptmodelle, Geometrie- und Funktionsprototypen, Technische Prototypen), die in den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung je nach Anwendungsgebiet und Branche mit unterschiedlicher Zielsetzung verwendet werden können [5] [6], etabliert, sondern auch zur Fertigung von Serienteilen, die sich nur durch die Herstellungsart von den konventionell hergestellten Serienprodukten unterscheiden. Diese Technologien arbeiten dazu werkzeuglos und mit niedrigerem Materialverlust.

Die diversen Verfahren des Rapid Prototyping und daraus abgeleitete Methoden, wie beispielsweise das Rapid Tooling oder Rapid Manufacturing, stellen demnach mächtige Werkzeuge vieler Unternehmen dar. Mit diesen Verfahren kann durch hochflexible Produkte eine schnelle Reaktion auf individuelle Kundenwünsche garantiert werden, und zwar in vielen Branchen (Luft- und Raumfahrttechnik, Militär, Motorsport, Automobilindustrie, Werkzeuge und Werkzeugmaschinen, Medizintechnik, Zahnmedizin, Kunst und Schmuck, Konsumprodukt, Haushaltsgeräte, usw.) [7], die ein Schritthalten auf dem sich ständig ändernden Weltmarkt mit zunehmendem Konkurrenzdruck erst möglich machen(vgl. Abbildung 1-1).

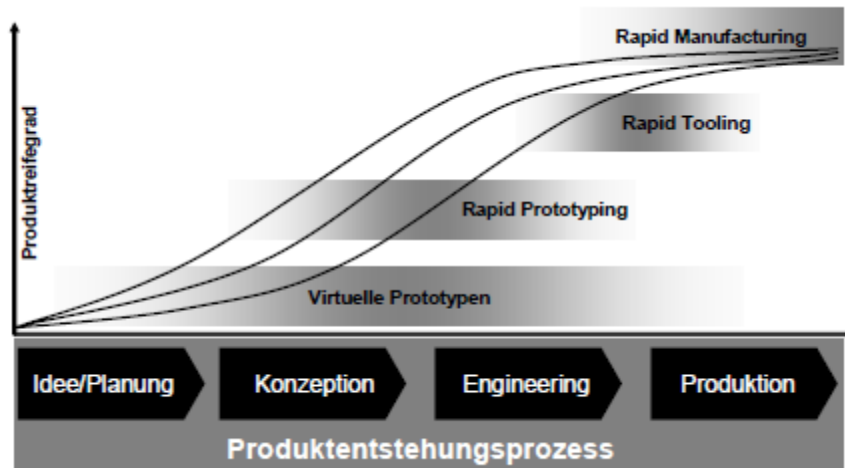


Abbildung 1-1: Anwendungsbereiche generativer Fertigungstechnologien innerhalb eines Produktentstehungsprozesses [8]

Wesentlicher Vorteil der Rapid Technologien im Vergleich zu den konventionellen abtragenden Fertigungsverfahren ist, dass die Fertigungszeit und –kosten kaum mehr von der Komplexität des zu fertigenden Bauteils abhängig sind. Alles, was bei der Kostenrechnung des Produkts zählt, sind lediglich seine Größe und seine Lage in dem Anlagenbauraum (vgl. Abbildung 1-2). Daher ist der Einsatz dieser Verfahren in erster Linie bei der Herstellung von sehr komplexen und kleinen Bauteilen sinnvoll [9] und wenn die Kundenanforderungen sich rasch ändern oder vielfältig sind, und bei Produkten mit kurzen Lebenszyklen und einer geringen absoluten Stückzahl [10].

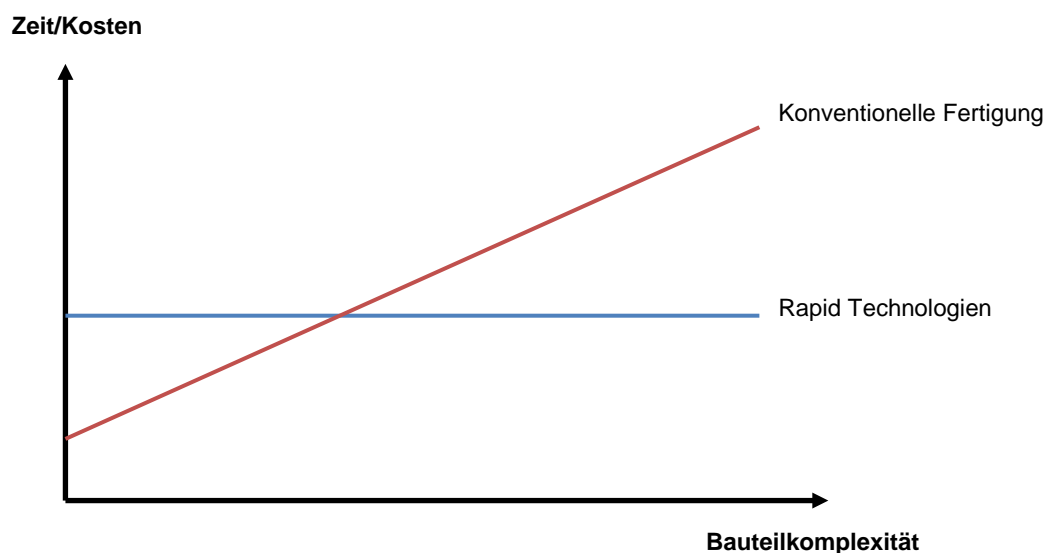


Abbildung 1-2: Abhängigkeit der Fertigungszeiten und –kosten von der Bauteilkomplexität [9]

2 Stand der Technik und Zielsetzung

2.1 Laser-Sintern

Das in dieser Arbeit behandelte Laser-Sintern (LS) ist eines der bekanntesten und am häufigsten eingesetzten generativen Fertigungsverfahren. Es ist dem Sintern sehr ähnlich, daher auch sein Name. Pulver wird, in der Regel durch einen Laser, lokal an- bzw. aufgeschmolzen und erstarrt nach dem Abkühlen zu einem festen Körper. Allerdings wird auf den hohen Druck und die lange Reaktionszeit des ursprünglichen Sinterns verzichtet.

Die physikalische Erstellung der einzelnen Schichten erfolgt im LS in generativer Weise, demnach findet sich diese Technologie in der ersten Hauptgruppe von DIN 8580 „Urformen“ wieder und grenzt sich somit von den traditionellen trennenden oder umformenden Fertigungsverfahren ab [11].

Beim Laser-Sintern kann eine Vielzahl an Materialien und Materialkombinationen genutzt werden (vgl. Kapitel 3.3.3). Verwendbar sind alle Werkstoffe, die sich thermoplastisch verhalten, also durch Wärmezufuhr schmelzen und sich beim Abkühlen wieder verfestigen [12].

Die Ausgangsbasis beim LS, wie bei allen anderen generativen Fertigungsverfahren, ist eine 3D-CAD-Datei des herzustellenden Bauteils. Die drei Hauptquellen für diese 3D-Daten sind 3D-CAD-Daten aus der Konstruktion, die Umsetzung von Messdaten aus der Physik oder Medizin (3D-Scannen, Computertomographie CT oder MRT) sowie die CAD-Mathematischen Daten [13]. Abbildung 2-1 veranschaulicht die verschiedenen 3D-CAD-Datenquellen und den Weg vom 3D-CAD-Modell zum fertigen Bauteil bei dem Laser-Sintern.

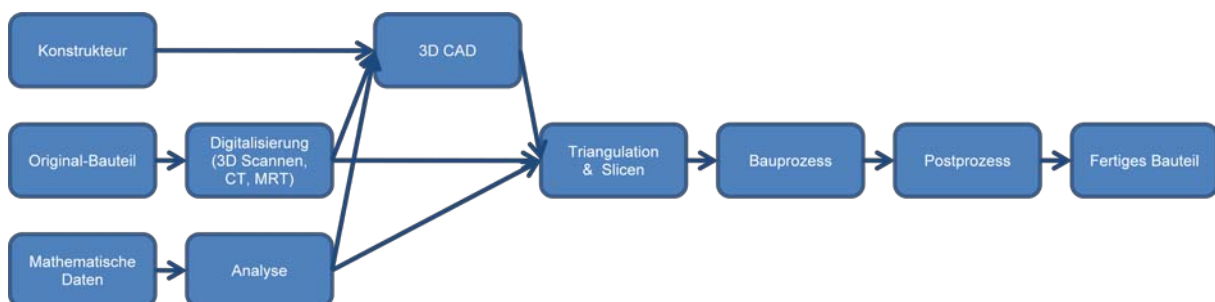


Abbildung 2-1: Prozesskette des Lasersinterns

Das Laser-Sintern, meist auch Selektives Laser-Sintern (SLS) genannt, wird vorrangig für die Fertigung von Kunststoffbauteilen verwendet. Ihr Pulvermaterial wird gewöhnlich nicht komplett aufgeschmolzen und die gefertigten Bauteile sind deshalb leicht porös.

2.2 Das Grundprinzip des schichtweisen Aufbaus:

Als additives Verfahren unterscheidet sich das LS dabei grundlegend von den üblichen subtraktiven und formativen Fertigungsverfahren, da es nach dem Schichtbauprinzip arbeitet (das Bauteil wird durch Fügen von einzelnen Volumenelementen gefertigt).

Die Oberfläche des virtuellen Modells wird zuerst durch eine Vielzahl von Dreiecken angenähert. Dieser Vorgang wird Triangulation genannt und geschieht bei der Übertragung in das Standard-Format STL. Die nötigen Geometrieinformationen des Bauteils werden direkt aus dem STL-Modell übernommen, welches virtuell durch das so genannte Slicen in zahlreiche einzelne Schichten definierter Dicke zerlegt wird.

Grundlage des Fertigungsprozesses ist ein pulverförmiger Werkstoff, der mit Hilfe einer Walze schichtweise im Bauraum aufgetragen wird (vgl. Abbildung 2-3). Die Dicke einer Pulverschicht kann in Abhängigkeit von der Pulverkorngröße variabel an die Bauteilanforderungen angepasst werden. Ein über Scannerspiegel gelenkter Laser, meist ein CO₂-Laser, fährt die aus dem CAD-Datensatz vorgegebene Schichtgeometrie in sich überlappenden Scanlinien ab [14].

Das Pulver wird im Bauraum auf eine Temperatur knapp unter Schmelzpunkt erhitzt, um die durch den Laser eingebrachte notwendige Energiemenge zum Versintern des Pulvermaterials zu minimieren und um die Verzugerscheinungen zu reduzieren. Durch die mittels des Lasers kurzfristig zugeführte Wärme verflüssigen sich an den abgefahrenen Stellen die Pulverpartikel und verbinden sich, ohne zusammenzufließen (Sinterprozess) [12]. Bei der Abkühlung entsteht ein festes zusammenhängendes Gefüge. Die nächste Schicht wird aufgetragen, sobald dieser Prozess abgeschlossen ist. Die Wiederholung von Schichtauftrag, Scannen und Abkühlen erfolgt, bis alle Schichten des Bauteils gefertigt sind. Das unversinterte Pulver im Bauraum stützt die unfertigen Bauteile, so dass keine zusätzliche Stützkonstruktion notwendig ist.

Durch Einbringen von Energie Schicht für Schicht mittels des Lasers setzt die Sinteranlage anschließend das Bauteil aus realen Schichten zusammen (vgl. Abbildung 2-2).

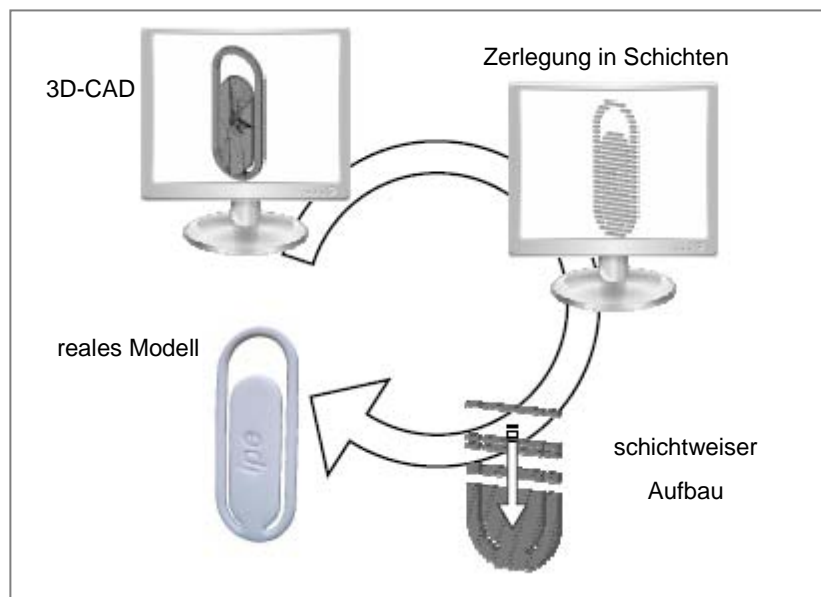


Abbildung 2-2: Prinzip der generativen Fertigung

Die Dauer der Fertigung hängt vorwiegend von der Anzahl der aufzutragenden Schichten ab. Innerhalb von wenigen Stunden oder Tagen werden Bauteile hergestellt, deren konventionelle Fertigung mehrere Wochen benötigt hätte. Außer der LS-Maschine werden für den Bauprozess keine weiteren Werkzeuge oder Einrichtungen benötigt.

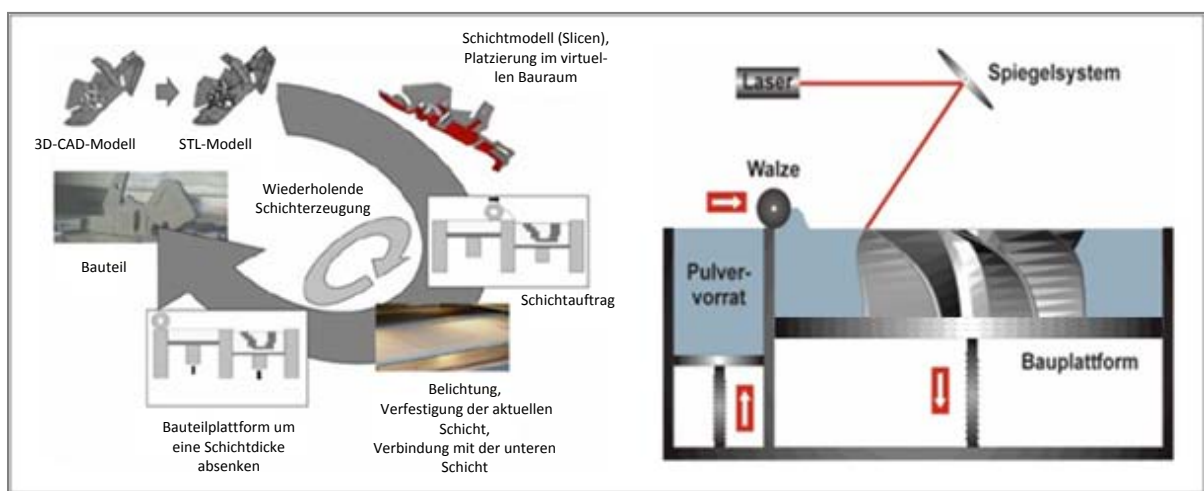


Abbildung 2-3: Prozesskette LS (links) [15] und Aufbauprinzip LS Anlagen (rechts) [16]

2.3 Zielsetzung und Aufgabestellung:

Bis zum heutigen Stand unterliegt der Fertigungsprozess mit der Technologie des LS keinen festgelegten Normen und es fehlen immer noch Kenntnisse über die thermomechanischen Vorgänge und deren Auswirkung auf den Bauprozess und die Bau-

teilqualität. Gleichzeitig besteht Optimierungsbedarf, zum einen bezüglich der Prozessparameter und zum anderen bezüglich der erzielbaren Bauteilqualität.

In der Industrie hält man sich üblicherweise an den Voreinstellungen der Produzenten von LS-Anlagen und wenn überhaupt an den Erfahrungswerten der Dienstleister fest. Die Eigenschaften der lasergesinterten Kunststoffbauteile hängen aber von einer Vielzahl unterschiedlichster Parameter und Stellgrößen ab, denen jeweils ein unterschiedlicher Einfluss auf den Bauprozess und die Bauteilqualität zuzuschreiben ist. Sie bestimmen wesentlich die Genauigkeit des Bauteils, seine mechanischen und optischen Eigenschaften, die mögliche Baugeschwindigkeit sowie die Wirtschaftlichkeit der Herstellung.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Einflussgrößen des generativen Fertigungsverfahrens Laser-Sintern detailliert betrachtet werden.

Ziel ist es, zu untersuchen, wie die jeweilige Einflussnahme auf den Fertigungsprozess und auf Eigenschaften des Produktes ist und welche Bedeutung die möglichen Veränderungen besitzen. Dabei wird besonders auf den Einfluss von den Scanstrategien auf die Qualität der Bauteile eingegangen. Es wird auch versucht, die einzelnen Prozessparameter in Hinsicht auf die für das jeweilige Bauteil angestrebten Eigenschaften zu optimieren, indem für jeden einzelnen Prozessparameter ein Variationsbereich bestimmt wird, in welchem er zur Verbesserung bzw. zur Beibehaltung der gewünschten Eigenschaften trotz der Beschleunigung des Bauprozesses beitragen kann. Dazu werden auch die bestimmten Prozessparameterkombinationen mit verschiedenen Scanstrategien untersucht und deren Einfluss auf die Qualität der Bauteile und auf die Geschwindigkeit des Bauprozesses ermittelt.

Das LS hebt sich vor allem durch die erreichbare Oberflächenqualität von anderen generativen Fertigungsverfahren ab. Diese erweist sich im direkten Vergleich mit RP-Verfahren auf Basis flüssiger Ausgangswerkstoffe als deutlich geringer, was auf den Sinterprozess zurückgeführt werden kann [17]. Für eine Verfahrensoptimierung müssen zusätzlich auch eventuelle Nachbearbeitungsschritte in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Anhand experimenteller Versuche soll untersucht werden, inwieweit die Oberflächenqualität der mit LS-Verfahren erzeugten Bauteile durch gezielte Nachbearbeitung mit den Verfahren der Oberflächentechnik verbessert werden kann. In der Analyse werden die Nachbearbeitungsverfahren Strahlen, Fräsen, Gleitschleifen, Infiltrieren, Lackieren betrachtet. Im Schwerpunkt wird untersucht, welche Verbesserung mit

den einzelnen Verfahren erreicht werden kann und welchen Restriktionen die Oberflächenbearbeitung im Einzelnen unterliegt. Ziel der Ausarbeitung ist zu bestimmen, bei welcher Anfangsrauheit die Verfahren effizient eingesetzt werden können, um bestmögliche Resultate zu erzielen.

3 Einflussgrößen beim Laser-Sintern von Kunststoff

Neben der Erfahrung des Anwenders und der Qualität der STL Datei und dem technischen Zustand der Sinteranlage unterliegt die Fertigung mittels Laser-Sinterns einer Vielzahl an Einfluss- und Stellgrößen, die den Bauprozess und die Bauteilqualität stark beeinflussen können.

Die Einflussgrößen beim Laser-Sintern von Kunststoff lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen: Prozesseigenschaften und Materialeigenschaften. Die Prozesseigenschaften stellen alle Einflüsse dar, die durch den Fertigungsprozess selbst vorgegeben sind. Die zweite Gruppe der Parameter, die Materialeigenschaften, werden durch den eingesetzten Werkstoff bestimmt.

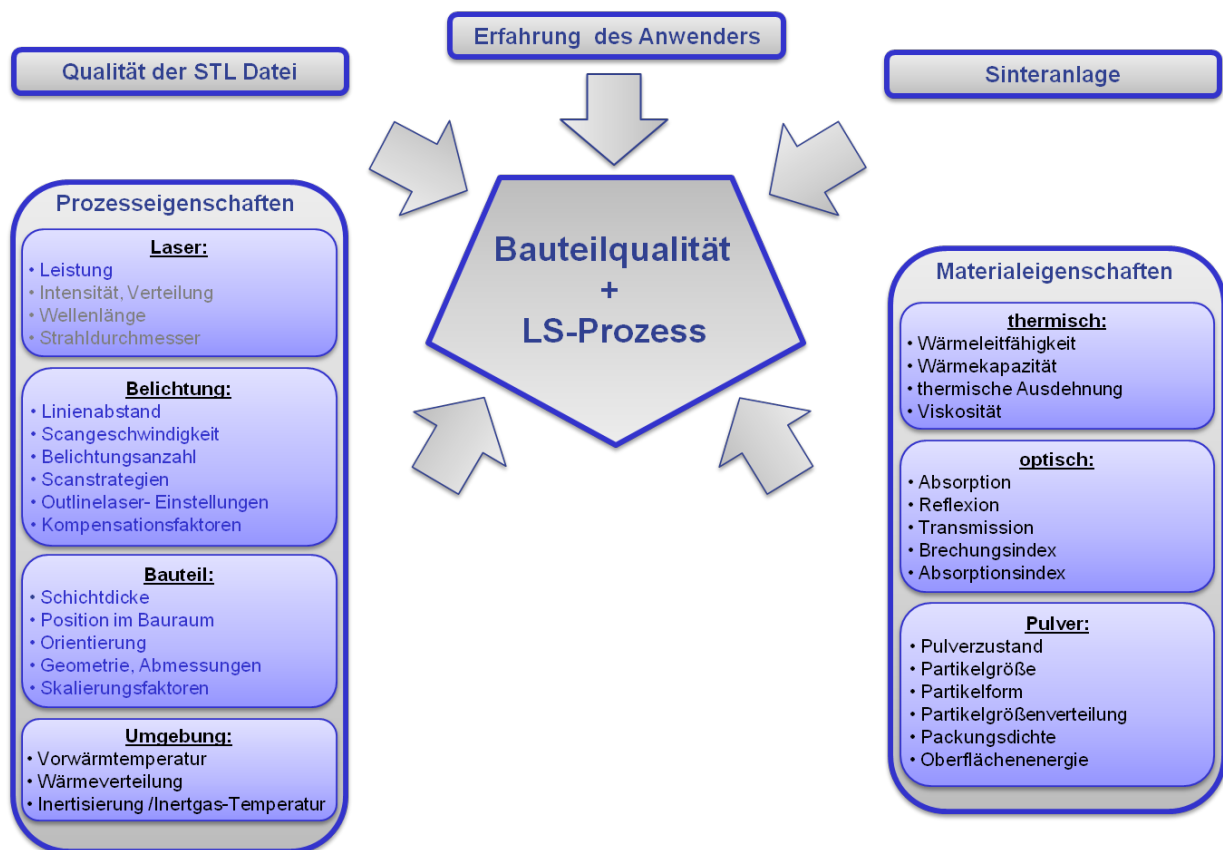


Tabelle 3-1: Einflussgrößen des Lasersinterprozesses [18]

Tabelle 3-1 zeigt die Unterteilung in weitere Unterkategorien. Die in grau geschriebenen Prozesseigenschaften lassen sich an den meisten Sinteranlagen durch den Anwender nicht verändern. Die in blau geschriebenen Parameter wurden besonders detaillierter in dieser Arbeit betrachtet.

3.1 Prozesseigenschaften

3.1.1 Energiequelle – Der Laser

Der Laser ist das eigentliche Werkzeug des Sinterprozesses beim LS. Er bringt die benötigte Wärmeleistung zur schmelzenden Bearbeitung in das bereits vorgewärmte Pulver ein.

Am weitesten verbreitet ist der CO₂-Laser, der in den LS-Anlagen vieler Hersteller eingesetzt wird. Der CO₂-Laser ist ein elektrisch angeregter Gaslaser. Das aktive Medium ist ein Gasgemisch, bestehend aus Kohlendioxid (CO₂), Stickstoff (N₂) und Helium (He). N₂-Moleküle werden in einem Entladungsrohr durch eine Gasentladung zum Schwingen angeregt und kollidieren mit CO₂-Molekülen, die dadurch ihrerseits zu schwingen beginnen. Dabei verlieren sie Energie und emittieren Photonen. Die Atome des Edelgases haben die Aufgabe, die Entleerung des unteren Laserniveaus durch Stöße mit den CO₂-Molekülen zu beschleunigen. Sie nehmen die Wärme auf und leiten sie ab [19].

Die Wellenlänge des CO₂-Lasers beträgt in der Regel 10,6 µm und liegt weit über dem sichtbaren Lichtbereich, weshalb die Strahlung nicht in Glasfasern geführt werden kann, da diese das Laserlicht des CO₂-Laserstrahls nahezu vollständig absorbieren [20] [21].

Der Laserstrahl wird daher über Spiegel umgelenkt und zum Scanner geführt.

CO₂-Laser sind sehr leistungsstark und finden eine breite Anwendung in der Industrie. Sie decken einen Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 15 kW ab, sind relativ kostengünstig und besitzen zudem einen guten Wirkungsgrad von 15 bis 40 %. Nachteilig ist die Strahlführung über ein komplexes Spiegelsystem.

Für die Bearbeitung von Kunststoffen ist der CO₂-Laser von allen Laserarten am besten geeignet (vgl. Kapitel 3.1.1.2), weshalb er in vielen LS-Anlagen eingesetzt wird.

3.1.1.1 Laserleistungen:

Die Laserstrahlleistung P_L ist die Summe der optischen Leistung des Strahls und zum Aufschmelzen des Pulvermaterials erforderlich.

Die Sinterstation® DTM 2000 und 2500 nutzen einen 50 W starken CO₂-Laser. Die Laserleistung der DTM Sinterstation® 2000 im Bauprozess beträgt für Polyamid (DuraForm® PA 12) erfahrungsgemäß 7 W, für Polystyrol ca. 18 W. Sie ist jedoch nicht nur vom eingesetzten Werkstoff abhängig, sondern auch von den anderen Prozesseinstellungen.

Der Laserstrahl wird durch eine Linse fokussiert. Der Fokus bzw. der Brennpunkt stellt den kleinsten Strahldurchmesser dar. Die Leistungsdichte ist hier um einige Zehnerpotenzen erhöht. Je kleiner der Fokus, desto feiner lässt sich das Material bearbeiten und durch die höhere Intensität des Strahls auch die Scangeschwindigkeit erhöhen [20](vgl. Abbildung 3-1).

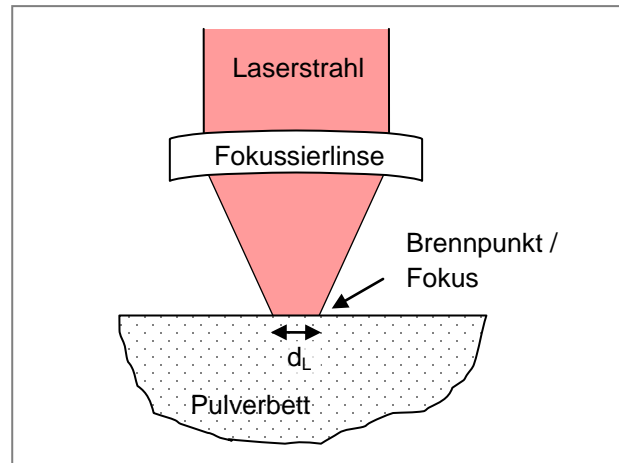


Abbildung 3-1: Fokussierung des Laserstrahls

3.1.1.2 Wellenlänge

Die Wellenlänge bestimmt nicht nur die Farbe des Lichts sondern auch seine Energie. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto energiereicher ist das Licht bzw. der Laser [22]. Der Absorptionsgrad A des Pulvers ist auch je nach Wellenlänge λ des Laserstrahls unterschiedlich. Um einen möglichst großen Teil der Laserenergie aufnehmen zu können, muss eine hierfür ideale Wellenlänge gewählt werden. Durch diese wird die Art des einzusetzenden Lasers bestimmt. Bei einem geringen Absorptionsvermögen des Werkstoffes muss die Laserleistung entsprechend erhöht werden, um genügend Energie zum Aufschmelzen in das Pulver einbringen zu können.

Grundsätzlich ist eine Wellenlänge zwischen 0,2 und 0,5 μm für Metalle und organische Werkstoffe (Isolatoren) günstig, da die Werkstoffe hier ein Absorptionsvermögen zwischen 10 und 90 % aufweisen. Dieser Bereich wird von Helium-Cadmium-(HeCD) und Nd:YAG-Lasern abgedeckt.

Höhere Absorptionswerte (>90 %) lassen sich für Werkstoffe wie Polyamid bei Wellenlängen im Bereich von 10,6 μm erzielen, welcher von CO_2 -Lasern erreicht wird [1](vgl. Abbildung 3-2).

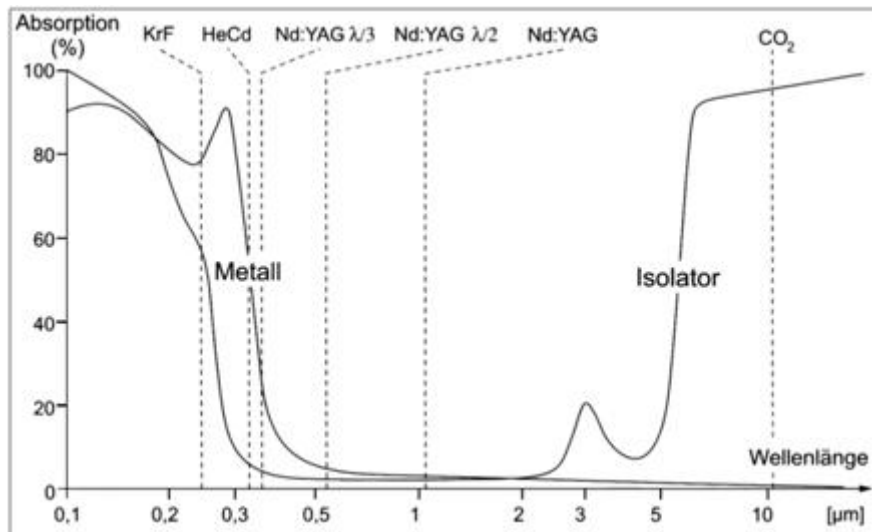


Abbildung 3-2: Absorptionsvermögen in Abhängigkeit der Wellenlänge [1] [23]

3.1.1.3 Strahldurchmesser

Der Laserstrahldurchmesser d_L zur Bearbeitung des Pulvermaterials wird durch den Fokus bestimmt (vgl. Abbildung 3-1). Bei der Sinterstation[®] DTM 2000 hat er einen Durchmesser von 0,3 - 0,4 mm, woraus die minimal herstellbare Bauteildicke in der Ebene resultiert.

Die Breite einzelner Spuren kann diesen Wert nicht unterschreiten. In Kombination mit dem kreisförmigen Umriss des Laserspots ergeben sich Einschränkungen beim Bau bestimmter Konturen. Spitze, außen liegende Ecken sind durch die Kreisform nicht herstellbar und sehr schmale Stege mit Breiten unterhalb von d_L ebenso wenig [24](vgl. Abbildung 3-3).

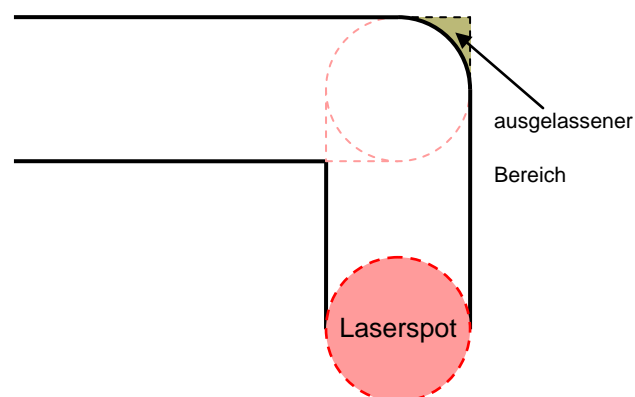


Abbildung 3-3: Einschränkung bei der Fertigung spitzer Ecken

An innen liegenden Ecken tritt der Fehler nicht auf, da sich dort die Verfahrswege in x- und y-Richtung überkreuzen.

Das Problem von zu schmalen Stegen kann auf zwei Arten angegangen werden.

Geometrische Details, die durch den Laser nicht korrekt abgebildet werden können, werden ausgelassen (Abbildung 3-4a).

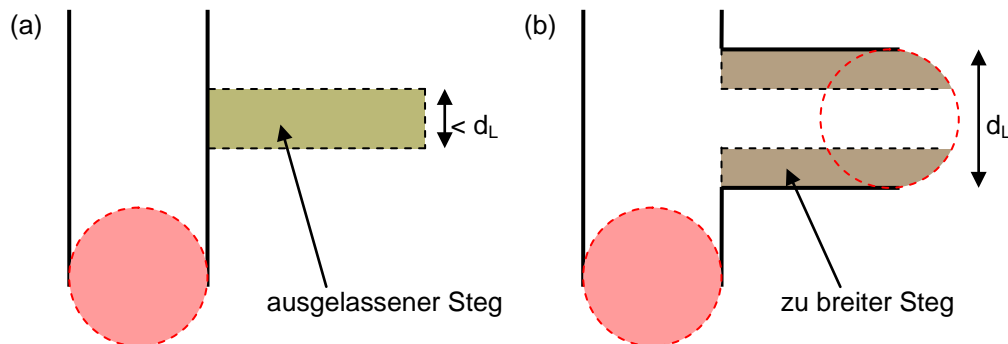


Abbildung 3-4: Zwei Möglichkeiten zum Umgang mit schmalen Stegen

Dadurch wird eine Übertreibung von Konturen vermieden, was unter Umständen der Passgenauigkeit des Bauteils zugutekommt. Allerdings können je nach Feinheit der Detaillierung sehr dünne Elemente kleiner als der Strahldurchmesser d_L nicht gebaut werden, was Auswirkungen auf Optik und Funktionsfähigkeit des Bauteils haben kann. Um dem entgegenzuwirken, kann der zweite Ansatz genutzt werden. Der schmale Steg aus Abbildung 3-4b wird so gut wie möglich nachempfunden, auch wenn die Maßgenauigkeit darunter leidet. Jedoch werden alle Geometrien gesintert und Auslassung sowie Übertreibung sind nie größer als der Strahldurchmesser. Dieser Ansatz wird wegen der Vorhersagegenauigkeit der Abweichung gegenüber der Konstruktion von den Maschinenherstellern bevorzugt [24].

3.1.2 Belichtung

Die Konturierung der Schichten funktioniert bei DTM-Anlagen mit dem Rasterverfahren.

Bei diesem Verfahren wird die Schichtgeometrie zeilenweise generiert, ähnlich dem Bildaufbau eines Röhrenfernsehers. Die Dauer der Belichtung einer jeden Schicht hängt nicht wesentlich von ihrer Komplexität ab. Durch das vorgegebene Raster in der x-y-Ebene entsteht bei nicht rechtwinkliger Geometrie von Zeile zu Zeile ein Stufeneffekt, ähnlich dem schichtdickenbedingten in z-Richtung (vgl. Kapitel 3.1.4.5). Seine Höhe ist durch die Breite des Laserstrahls im Brennpunkt und durch den Linienabstand bestimmt. Da diese Werte üblicherweise größer sind als die typischen Schichtdicken, ist der Treppeneffekt in der Ebene deutlicher als in z-Richtung. Dieser Treppeneffekt in der Bauebene kann allerdings durch den Einsatz vom Outlinelaser gänzlich korrigiert werden.

3.1.2.1 Scangeschwindigkeit

Die Scangeschwindigkeit v_s ist die Geschwindigkeit, mit der der Scanner den Laserstrahl über das Pulverbett führen und dieses belichten kann.

Eine hohe Belichtungsgeschwindigkeit ist wirtschaftlich gesehen erstrebenswert, da so eine kürzere Bauzeit erreicht wird. Bei der Sinterstation® DTM 2000 wird ein Standardwert von 1257,3 mm/s eingesetzt. Die Scangeschwindigkeit korreliert zudem auch mit der Bauteilfestigkeit und –oberflächenqualität (vgl. Kapitel 5.5).

3.1.2.2 Scanlinienabstand

Der Scanlinienabstand, im englischen Slicer Fill Scan Spacing, bezeichnet den Versatz der Sinterlinien quer zur Sinterrichtung. Dadurch ist die Überlappung der nebeneinander liegenden Spuren bestimmt, woraus ihre Verbindungsstärke resultiert.

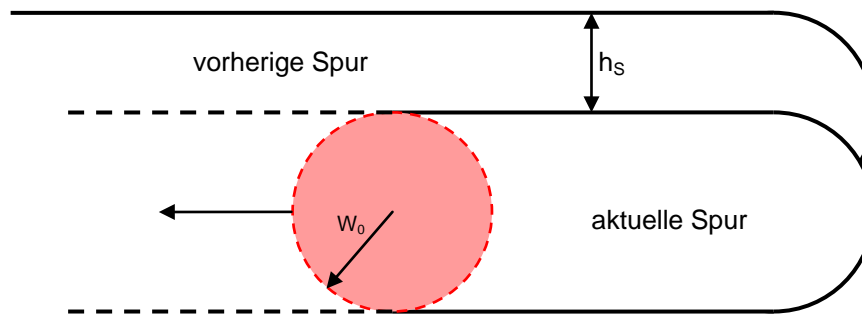


Abbildung 3-5: Scanlinienabstand h_s zwischen den Sinterspuren (in Anlehnung an [27])

Aus einem geringen Linienabstand h_s folgt eine hohe Festigkeit, aus einem größeren ein schnellerer Bauprozess (vgl. Kapitel 5.4). Damit eine Verbindung überhaupt möglich ist, muss h_s kleiner als der Laserstrahldurchmesser d_L sein. In der Regel beträgt der Linienabstand 0,15 mm.

3.1.2.3 Spurbreitenkompensation

Im Bauprozess überstreicht die Laserstrahlmitte die vorgegebene Kontur. An Bauteilrändern führt dies zu Maßabweichungen, da eine Strahlhälfte Material außerhalb der Sollkontur versintert. Außenkonturen werden zu groß, Innenkonturen zu klein. Abbildung 3-6 verdeutlicht dies anhand einer Platte mit mittiger Aussparung. Der Strahlmittelpunkt fährt die äußere und innere Sollkontur ab, wobei der Radius w_0 Pulver außerhalb der Geometrie überstreicht. Da der Laserspot einen fokussierten Durchmesser von 0,3 - 0,4 mm hat, beträgt die Abweichung zur Sollkontur 0,15 - 0,2 mm. Daraus folgen Übermaße von insgesamt ca. 0,4 mm in x- und y-Richtung. Der kleine Einschnitt auf der rechten Seite der Platte wird dadurch sogar komplett geschlossen.

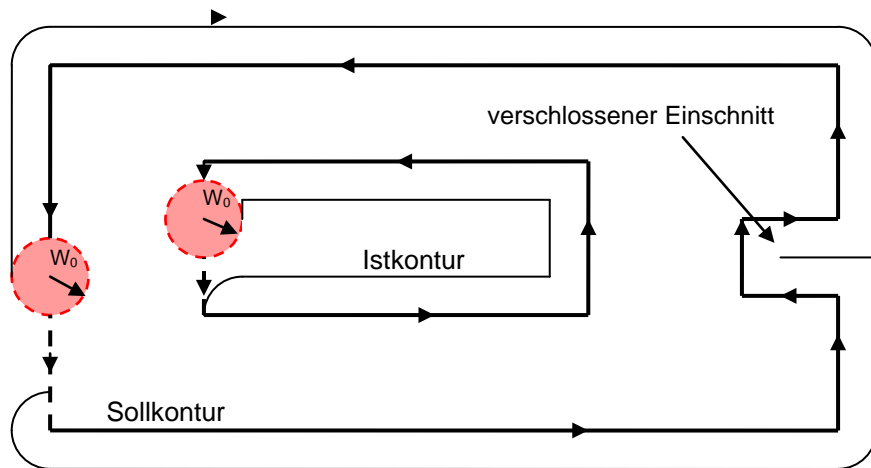


Abbildung 3-6: Übermaße durch die Spurbreite des Laserstrahls

Die Maschinensteuerung korrigiert den Fehler, indem der Scanner eine angepasste Kontur abfährt, bei der die Spurbreite des Lasers berücksichtigt worden ist. Dieser Ausgleich wird Spurbreitenkompensation genannt (engl. Beam Offset).

Damit die Spurbreite des Lasers kompensiert werden kann, wird ein Pfad parallel zur Kontur berechnet. Dies ist ein Polygonzug, auch Offsetkontur genannt, der der Originalkontur stark ähnelt und lediglich nach innen verschoben ist. Dazu muss jeder Punkt der Offsetkontur zwei Bedingungen erfüllen:

1. Der Abstand zur Originalkontur entspricht dem halben Durchmesser des Laserspots (Radius W_0).
2. Er befindet sich auf Seite der zu belichtenden Geometrie.

Bedingung 1 wird noch von zwei Punkten erfüllt, die jeweils inner- und außerhalb der Geometrie liegen. Durch Bedingung 2 existiert nur noch ein Punkt [24].

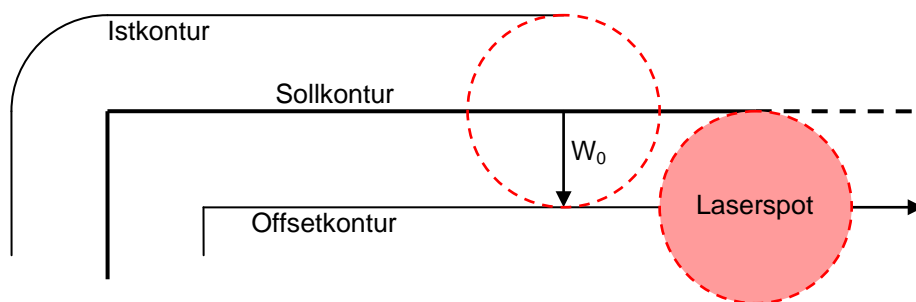


Abbildung 3-7: Spurbreitenkompensation durch Verschiebung des Laserspots um den Radius W_0

Die korrigierte Sollkontur ist damit um den Wert W_0 in die zu belichtende Geometrie verschoben (Offsetkontur), wodurch nun die Istkontur der Sollkontur entspricht.

Bei der Belichtung einer Schicht soll auch der Laserdurchmesser vom Füllaser berücksichtigt und ausgeglichen werden [24]. Der Füllaser-Kompensationsfaktor stellt

den Abstand zwischen der Soll-Außenkontur und den Umkehrpunkten des Fülllasers dar. Dieser Abstand soll größer als der Laserstrahlradius sein, um die Sollkontur nicht zu überschreiten und kleiner als der Laserdurchmesser um eine starke Verbindung zwischen dem Innenbereich und der Kontur zu gewährleisten.

Filllaser-Kompensationsfaktor = $2 \times (\text{Outline-Kompensationsfaktor}) \approx 0,3 \text{ mm}$

3.1.3 Umgebung

Zu den Umgebungsgrößen zählen die Faktoren, die das Bauraumumfeld im Fertigungsprozess beeinflussen. Dazu gehören die Inertisierung mittels Schutzgas und die Temperierung des Pulvermaterials durch mehrere Heizsysteme.

3.1.3.1 Schutzgas

Der gesamte Bauprozess beim Laser-Sintern läuft unter Schutzgas ab. Die meisten Anlagen arbeiten mit einer Inertgasatmosphäre aus Stickstoff. Je nach Sinteranlage wird für die Stickstoffversorgung eine externe Versorgung benötigt, wie bei der Sinterstation[®] DTM 2000, oder die Maschine gewinnt das Gas direkt aus der Umgebungsluft mittels einer Luftzerlegungsanlage.

Die Inertisierung des Bauraumes ist aus zwei Gründen notwendig: Durch den geringen Restsauerstoff wird einerseits eine mögliche Pulverexplosion verhindert, andererseits eine Oxidation des Werkstoffes, wodurch Verfärbungen der Bauteile vermieden werden. Ohne eine Sauerstoffverdrängung besteht ferner die Gefahr, dass das Material bei zu hoher Laserleistung verbrennt.

Die DTM Sinterstationen[®] nutzen ebenfalls eine Stickstoffatmosphäre. Der Anteil des Restsauerstoffes ist variabel einstellbar; die Sinteranlage wird bis auf 5,5 % Restsauerstoff mit Stickstoff geflutet. Dieser Wert entspricht den Herstellerangaben für den Polyamid-Werkstoff PA12.

Zusätzlich kann die Funktion „Downdraft“ (dt. Abwind) aktiviert werden, womit der Gasstrom zur Wärmeverteilung im Pulverbett eingesetzt wird. Die Atmosphäre aus dem Bauraum wird zur Bauplattform hin abgesaugt. Hierbei wird das warme Prozessgas auf das Pulverbett gedrückt, wodurch Wärme von der Oberfläche in den Pulverkuchen transportiert wird. Somit verlangsamt sich die Auskühlung der Bauteile. Bei manchen Teilen kann der Downdraft jedoch zu einem „Wachsen“ führen. Das geschieht besonders bei großen Bauteilen oder Teilen mit Überhängen, die den Wärmefluss durch das Pulverbett behindern. Abhilfe schafft hier eine reduzierte Gas-

strömung. Sollte das Maß an Verzug der Bauteile nach der Fertigstellung steigen, kann der Volumenstrom für die nächsten Bauprozesse erhöht werden [26].

Die Nutzung des Downdrafts schlägt sich jedoch in den Kosten nieder, da sie einen erhöhten Stickstoffverbrauch zur Folge hat.

3.1.3.2 Vorwärmtemperatur

Beim Selektiven Laser-Sintern wird das Pulvermaterial bis ca. 10°C unterhalb seiner Schmelztemperatur vorgewärmt. Die Vorwärmung verringert die Differenz ΔT zwischen Schmelztemperatur (DuraForm PA12 184°C) [26] und Pulvertemperatur (174°C), wodurch thermische Spannungen während des Baus und somit ein Verzug der Bauteile verringert wird. Die restliche Wärmeenergie bis zum Schmelzpunkt des Werkstoffes wird durch den Laser aufgebracht.

Die DTM Sinterstationen® besitzen drei unabhängige Heizsysteme, die für stabile Temperaturbereiche sorgen. Eines ist für den Pulvervorrat zuständig, ein weiteres für den Bauraum und die zu bearbeitende Pulveroberfläche, das dritte befindet sich im Boden der Bauplattform (vgl. Abbildung 5-32).

Vor Baubeginn muss die Anlage zuerst sorgfältig auf Betriebstemperatur gebracht werden. Die Aufwärmphase (engl. Warm-Up) dauert ca. 1,5 bis 2 Stunden. Währenddessen trägt die Maschine eine insgesamt ca. 20mm dicke Pulverschicht auf, die den später erstellten Bauteilen als thermische Isolierung dient.

3.1.3.2.1 Temperierung des Vorratsbehälters

Das Frischpulver des Pulvervorratsbehälters (engl. Feed) wird durch einen Infrarotstrahler von oben bestrahlt. Es wird langsam bis zu der maximalen Temperatur erwärmt, bei der es noch fließfähig ist. Dies begrenzt den Umfang des thermischen Schocks des Pulverbettes, wenn das kühlere Frischpulver im Bauraum aufgetragen wird. Ist die Temperatur zu niedrig, kühlen die Bauteile zu schnell ab und beginnen sich zu verformen. Ist sie dagegen zu hoch, lässt sich das Frischpulver nicht richtig von der Auftragswalze verteilen. Hinzu kommt, dass die warmen Bauteile das Frischpulver zum Schmelzen bringen können, noch bevor es vom Laser bearbeitet werden kann [26].

Durch das vorzeitige Verbacken einzelner Teilchen kommt es zudem zu einem Aufreißen der frischen Pulverschicht [27].

In den Sinterstation[®] DTM 2000 wird das Polyamid-Pulver der Vorratsbehälter auf 90°C erwärmt. Ein Sensor misst die Temperatur in der obersten Frischpulverschicht und stellt einen konstanten Wert sicher.

3.1.3.2.2 Temperierung der Pulveroberfläche

Nach jedem Pulverauftrag wärmt eine Heizung das frisch aufgetragene Pulvermaterial weiter auf. Dieser Heizkörper (engl. Part Heater) ist ringförmig ausgebildet und befindet sich zentral oberhalb der Bauplattform. Der Part Heater bestrahlt die Pulveroberfläche und hält auch den Pulverkuchen sowie die enthaltenen Bauteile auf Temperatur. Das 90°C warme Frischpulver aus dem Vorratsbehälter (vgl. Kapitel 3.1.3.2.1) wird bis auf 174°C aufgeheizt (DuraForm PA 12), bevor die neue Schicht vom Laser bearbeitet werden kann.

Zur Erzielung einwandfreier Bauteile ist diese Temperatur sorgfältig einzustellen und zu überwachen. Abweichungen führen zu einer schlechten Versinterung und anderen Mängeln, je nach Material auch zu Verfärbungen.

Ein Infrarotsensor misst die Temperatur an der Pulveroberfläche und reguliert die Heizstärke. Das Schutzglas des Sensors kann jedoch, wie das Laser-Window auch, im Bauprozess beschlagen und der Sensor damit fehlerhafte Messergebnisse liefern, woraus eine falsche Temperierung der Pulveroberfläche folgt. Das Resultat ist ein sehr schweres oder gar unmögliches Auspacken der Bauteile.

Während des Bauprozesses führen Temperaturunterschiede an verschiedenen Stellen der Bauteile zu einem unterschiedlichen Schrumpfen. Ursache ist ein zu starker Temperaturabfall nach Auftrag des kälteren Frischpulvers. Eine Schrumpfung des Materials nach der Bearbeitung durch den Laser ist prozessbedingt (vgl. Kapitel 3.1.4.4). Aus einer inhomogenen Schrumpfung können jedoch verzogene Bauteile resultieren (engl. Curl). Die Kanten biegen sich auf und das Bauteil ist nicht mehr flach. Da der Effekt während des Bauprozesses auftritt, spricht man vom In-Build-Curl. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Bauteile infolgedessen die Pulveroberfläche durchstoßen können und von der Beschichtungseinheit erfasst werden (vgl. Kapitel 3.2.3.1) [26].

Der Part-Heater selbst wärmt allerdings auch das Pulver nicht einheitlich auf. Die Wärmeströmung trifft ungleichmäßig auf das Pulverbett, weshalb im Außen- und Innenbereich unterschiedliche Temperaturen vorherrschen, abhängig von der Bauhöhe

Z. Im Laufe des Bauprozesses steigt die gespeicherte Wärme im Pulverkuchen, so dass der Verzug außen liegender Bauteile abnimmt.

Des Weiteren lässt sich eine unterschiedliche Verfestigung des losen Pulvers feststellen, abhängig von der Lage im Bauraum. Abbildung 3-8 zeigt die Abhängigkeit der Sintertiefe an der Sinterstation[®] DTM 2000 in zwei verschiedenen Bauebenen.

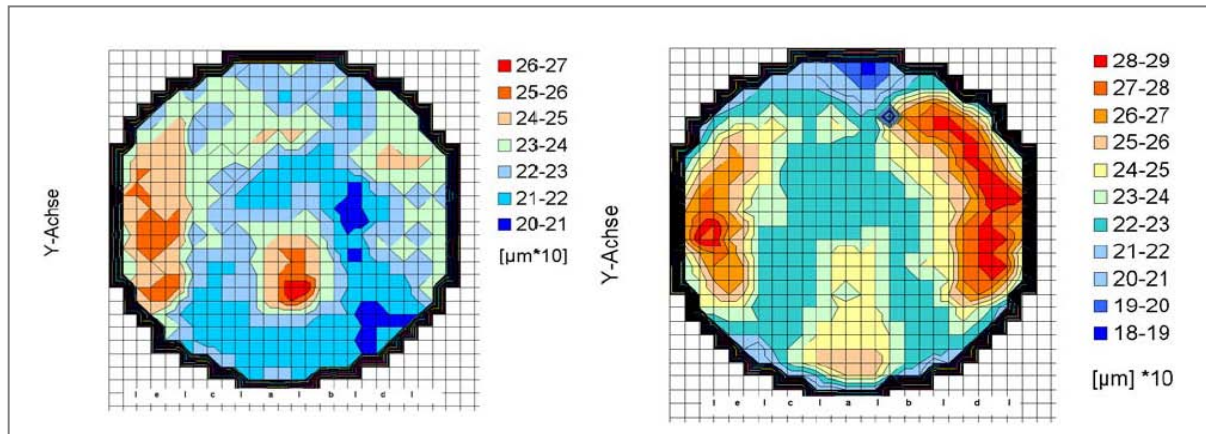


Abbildung 3-8: Verteilung der Sintertiefe in der Sinterstation 2000 bei Z= 0 mm (links) und Z= 130 mm (rechts) [27]

3.1.3.2.3 Temperierung der Bauplattform

Die Heizung der Bauplattform (engl. Piston Heater) erwärmt den Bauraumboden und vermindert ein Abkühlen des Pulverkuchens über die Bauplattform. Somit ist der Pulverkuchen von oben und unten temperiert. Die Temperatur der Plattformheizung wird für Polyamid PA 12 auf 155°C eingestellt.

3.1.3.2.4 Abkühlphase

Nachdem der Bauvorgang abgeschlossen ist, beginnt die Abkühlphase (engl. Cool down Stage). Die Temperatur im Bauraum wird abgesenkt, damit die gefertigten Bauteile entnommen werden können. Die noch warmen Teile müssen hierbei langsam und gleichmäßig abkühlen, um einen Verzug zu vermeiden.

Um dies zu gewährleisten, sind die Bauteile in einem Pulvermantel eingepackt, der sie von allen Seiten isoliert. In der Aufwärmphase (engl. Warmup Stage), vor Beginn des Bauprozesses, wird die Maschine eine ca. 20 mm starke Pulverdecke aufgetragen. An der Bauraumwand wird ebenfalls ein ca. 25 mm breiter Pulverbereich freigehalten, in dem keine Bearbeitung durch den Laser stattfindet.

Nach Abschluss der Bauphase trägt die Maschine weitere Pulverschichten im Bauraum auf, ohne diese zu belichten. In der DTM 2000 sind dies etwa 60 Lagen bzw. 6mm. Somit sind die Bauteile, unabhängig von ihrer Lage und Größe, von allen Seiten mindestens durch diesen isolierenden Pulvermantel umschlossen.

Abbildung 3-9 verdeutlicht dies am runden Bauraum der Sinterstation[®] DTM 2000. Während die Temperatur in der Maschine abnimmt, kühlt der Pulverkuchen ab. Der gesamte Vorgang ist sehr zeitintensiv und beansprucht mehrere Stunden.

Eine starke Abkühlung der warmen Bauteile nach dem Bau führt zu Temperaturgradienten und unausgeglichene Spannungen, woraus wiederum ein Verzug der Teile resultiert. Da dieser Vorgang erst im Anschluss an den Bauprozess abläuft, wird er im englischen Post-Build Curl genannt (26).

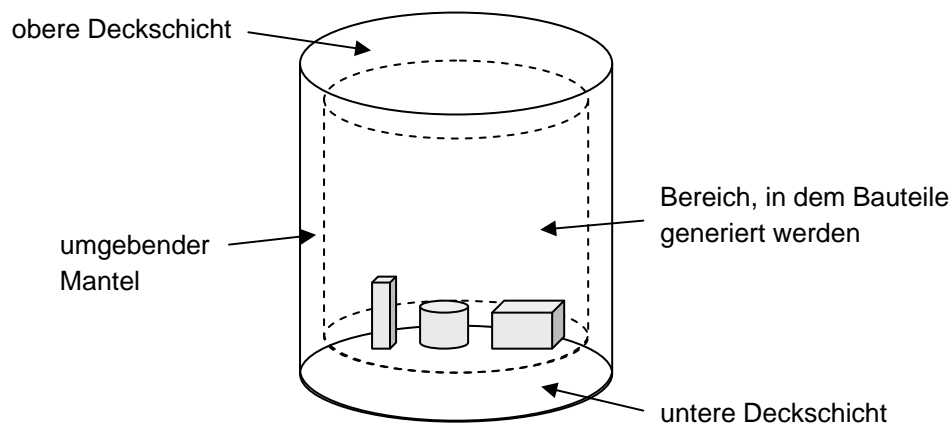


Abbildung 3-9: Isolierender Pulvermantel rund um den Baubereich (DTM 2000)

3.1.4 Bauteil

Dieser Bereich beinhaltet die einstellbaren Größen, die direkt mit dem Bauteil zusammenhängen. Das sind z. B. die aus dem 3D-CAD-Modell erstellte STL-Datei, die Geometrie und Abmessungen eines Teiles, sowie die Platzierung, mit der es im Bauraum erstellt werden soll. Dazu gehören auch die verwendete Schichtdicke und die Skalierungsfaktoren, die die Qualität und die Maßhaltigkeit des Bauteils bestimmen.

3.1.4.1 STL-Formatierung

Damit ein Bauteil generativ hergestellt werden kann, muss seine Geometrie in einzelnen Schichten mit definierten Konturen vorliegen. Das virtuelle 3D-CAD-Volumenmodell wird dazu in Schichten zerlegt, was „Slicen“ genannt wird. Zu diesem Zweck gibt es zwei Maßnahmen: Über die Triangulation und das direkte Schneiden im CAD. Das direkte Schneiden im CAD führt auf das CLI-(SLI-)Format, die Triangulation auf das STL-Format (Standard Transformation Language), wobei die Oberfläche des Bauteils durch unterschiedlich große Dreiecke angenähert wird. Die Dreieckspatches enthalten die Koordinaten der drei Eckpunkte und den Normalenvektor

in positiver Richtung nach außen. Das STL-Format ist de facto ein Industriestandard der generativen Fertigung und damit fast in jeder Anlage nutzbar [12].

Die Qualität eines Bauteils hängt neben der Art der Fertigung ebenfalls von der Qualität der erstellten CAD-Konstruktion bzw. ihrer Umwandlung in das STL-Format ab.

Ein Bauteil kann nie besser sein als das ihm zugrunde liegende CAD-Modell.

Sind Fehler oder Ungenauigkeiten enthalten, treten sie im Bauprozess negativ in Erscheinung. Daher werden vorher alle Daten mit einer RP-Software, z. B. Magics RP oder VisCAM RP, auf Fehler kontrolliert und ggf. korrigiert.

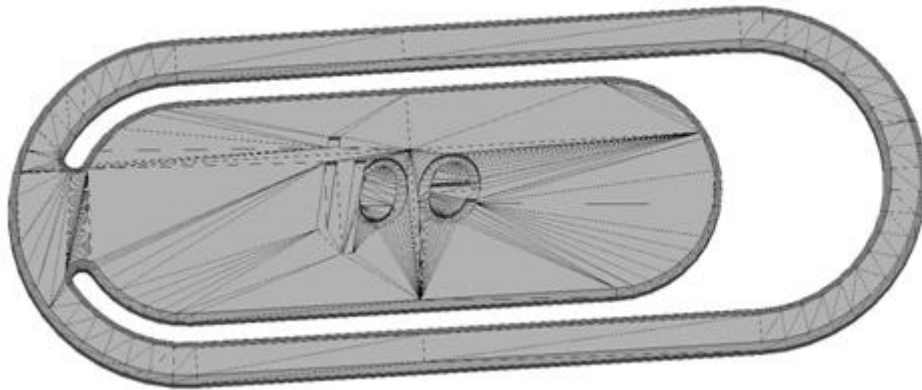


Abbildung 3-10: Durch 2772 Dreiecke modelliertes Bauteil „Lesezeichen“ im STL-Format

Der Typus der möglichen Fehler lässt sich nach Gebhardt in drei Arten unterteilen: Konstruktionsfehler, Umsetzungsfehler und Beschreibungsfehler.

Konstruktionsfehler beinhalten überflüssige Daten im Inneren eines Körpers und entstehen z. B. durch eine nicht korrekte Vereinigung von Körpern im CAD-Programm [12].

Im Gegensatz zu anderen generativen Fertigungsverfahren, wie z.B. dem Layer Lamine Manufacturing (LLM), haben sie beim Laser-Sintern jedoch keine massiven Auswirkungen auf das Bauteil.

Unnötige zusätzliche Geometrien im 3D-CAD-Modell führen allerdings zu einer längeren Fertigungszeit und damit verbundenen höheren Kosten.

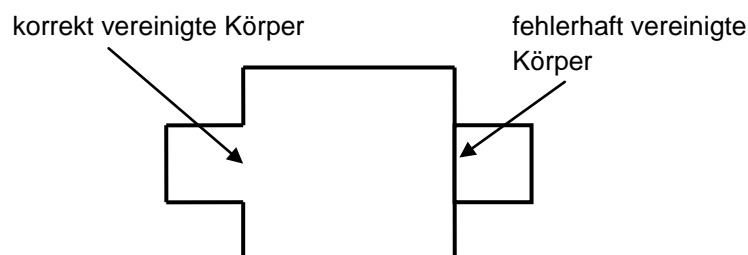


Abbildung 3-11: Konstruktionsfehler durch fehlerhaft vereinigte Körper (in Anlehnung an [12])

Umsetzungsfehler entstehen durch die STL-Formulierung. Die Oberfläche des Bauteils wird durch ebene Dreiecke angenähert. An planen Flächen und Schrägen stellt dies kein Problem dar, an Rundungen treten jedoch Kanten auf.

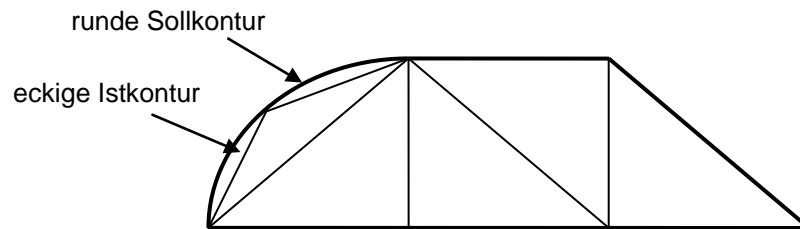


Abbildung 3-12: Eckige Rundungen bei der Annäherung durch Dreiecke (in Anlehnung an [12])

Perfekte Rundungen sind generell nicht möglich. Mit steigender Auflösung, d.h. einer feineren Triangulation durch eine höhere Anzahl an Dreiecken, kann die Genauigkeit einer runden Kontur allerdings immer weiter angenähert werden. Dadurch wächst jedoch die Datenmenge stark an, was einen höheren Rechenaufwand, längere Prozesszeiten und evtl. Prozessstörungen zur Folge haben könnte [5].

Abbildung 3-13 zeigt drei Kugeln, die jeweils durch eine unterschiedliche Anzahl an Dreiecken modelliert wurden.

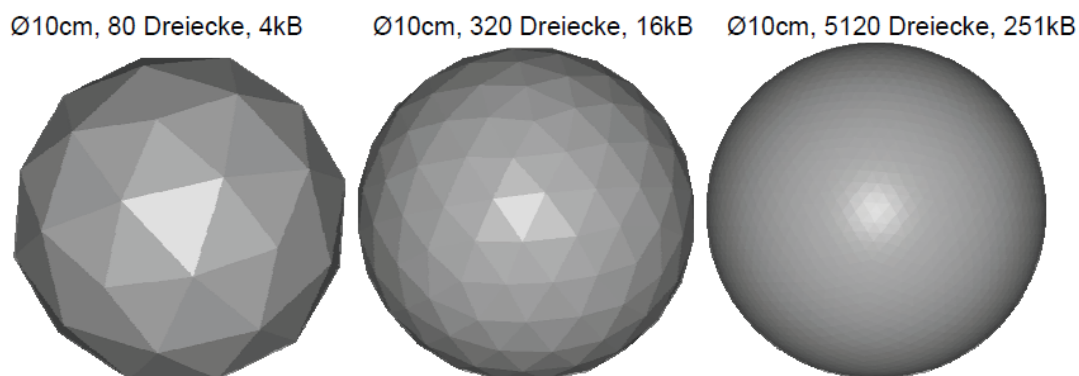


Abbildung 3-13: Einfluss der Anzahl der Dreiecke auf die Modellierung einer Kugeloberfläche

Alle Kugeln haben einen Durchmesser von 10cm. Die linke besteht aus 80 Dreiecken und besitzt eine äußerst grobe und kantige Oberfläche bei jedoch nur sehr geringer Dateigröße (4 Kilobyte). Die mittlere ist aus 320 Dreiecken aufgebaut (16 kB), die rechte hingegen aus bereits 5120. Sie gibt die kreisrunde Originalgeometrie sichtbar besser wieder, hat aber mit 251 kB auch eine deutlich gesteigerte Dateigröße.

Beschreibungsfehler zeichnen sich durch drei Arten aus: Lücken zwischen Dreieckspatches (Berandungsfehler), doppelte Dreieckspatches (Überlappungen) und eine falsche Orientierung einzelner Patches (Fehlorientierung) [12].

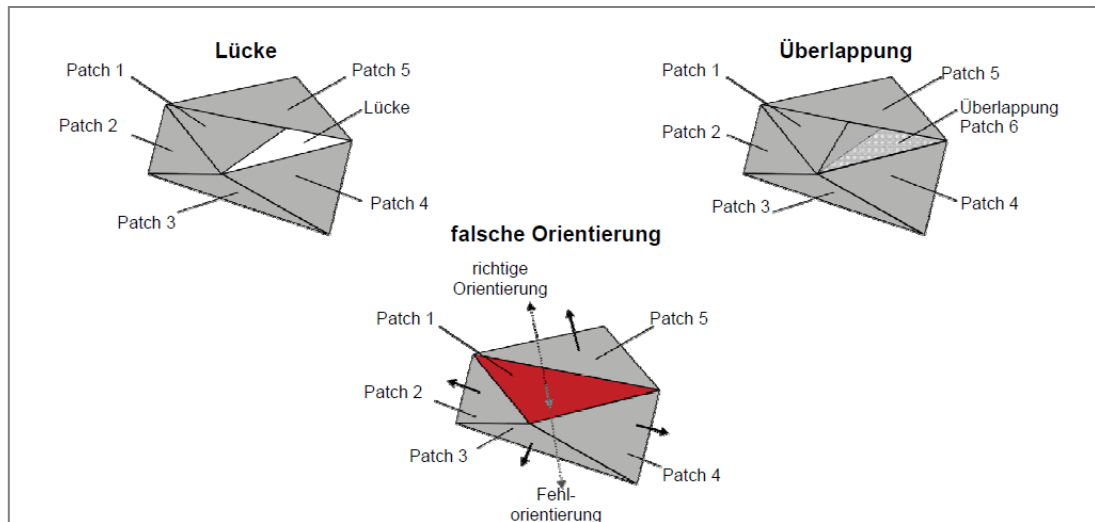


Abbildung 3-14: Beschreibungsfehler: Lücke, Überlappung und Fehlorientierung [5]

Sie können im Gegensatz zu den Konstruktions- und Umsetzungsfehlern bedeutende negative Auswirkungen auf die Fertigung haben. Unter Umständen ist diese nur mit Einschränkungen oder überhaupt nicht möglich. Eine ungenaue Berandung von aneinander grenzenden Patches führt zu Lücken. Das Modell ist dann nicht zu 100% „wasserdicht“. Spätestens mit dem Erstellen der maschinenspezifischen Schichtinformationen müssen sie deshalb geschlossen werden. Eine falsche Orientierung zeichnet sich dadurch aus, dass der Normalenvektor ins Modellinnere zeigt, nicht nach außen. Innen- und Außenseite des Körpers können so nicht mehr unterschieden werden [12]. Dies kann zu ungesinterten Schichten im Bauprozess führen, aus denen wiederum Defekte am Bauteil entstehen, wie Schichtablösungen und damit verbundene Festigkeitsverluste in Z-Richtung [5].

3.1.4.2 Geometrie

Die Geometrie eines Bauteils ist bei der generativen Fertigung, im Gegensatz zur konventionellen Fertigung, von geringer Bedeutung. Der Schichtaufbau ermöglicht den Bau komplexer Körper mit Hohlräumen und Hinterschneidungen.

Die Herstellung dünner Wände ist nur durch den Laserstrahldurchmesser d_L im Brennpunkt (0,3-0,4 mm) limitiert. Beim Strahlschmelzen hingegen ist diese Aushärtebreite durch die hohe Wärmeleitung etwas größer als der Fokusbereich [28].

Bei dünnen Teilen besteht ferner das Problem, dass sie schnell abkühlen und sich verziehen. Dies tritt besonders am Beginn von ebenen Flächen, beispielsweise in den ersten Schichten eines Bauteils und Überhängen in Erscheinung.

In der ersten Schicht hat dies noch keine größeren Auswirkungen, der belichtete Bereich unterliegt lediglich der normalen Schrumpfung. Die folgende Schicht wird je-

doch mit der ersten versintert, wobei die entstehende Volumenreduktion am Schichtübergang behindert wird. Zwischen beiden Schichten entstehen mechanische Spannungen σ_{mech} , die zum Verzug führen können und die Enden aufbiegen. Im englischen wird dies „Curl“, zu Deutsch „Locke“, genannt [18](vgl. Abbildung 3-15).

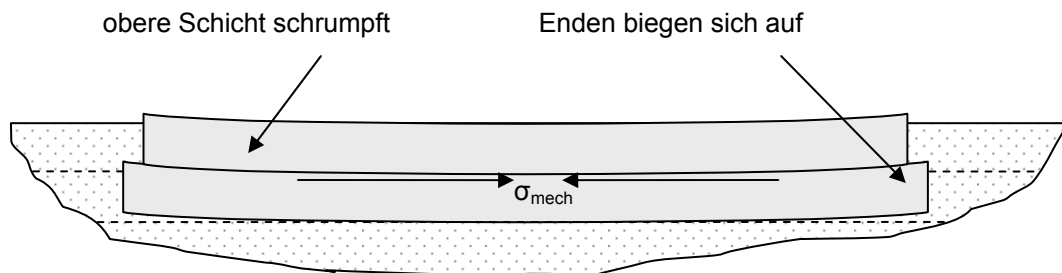


Abbildung 3-15: Verformung durch mechanische Spannungen σ_{mech} (in Anlehnung an [27])

Abhilfe schaffen in diesem Fall Stützkonstruktionen oder eine veränderte Ausrichtung im Bauraum. Massive Bauteile sind ebenfalls zu vermeiden. Durch ihre Bearbeitung wird eine große Wärmemenge eingebracht, die ebenfalls zu Verformungen führen kann.

Für jedes Bauteil existieren aber auch Prozessparameter, mit denen diese Probleme nicht mehr auftreten. Es kann also auch mit den richtigen Einstellungen für beispielsweise die Temperaturen der drei Heizsysteme gelöst werden.

3.1.4.3 Abmessung

Die Größe eines Bauteils ist durch das Volumen des Bauraums begrenzt, bzw. abzüglich eines isolierenden Mantels von dem für Bauteile nutzbaren Bereiches (vgl. Abbildung 3-9). Große Objekte benötigen aber auch eine entsprechend lange Bauzeit. Um diese so gering wie möglich zu halten, sollten die Maße in x-, y- und z-Richtung beschränkt werden. Die Höhe in z-Richtung bestimmt die Anzahl der zum Aufbau erforderlichen Schichten. Die Summe von zusätzlichen Belichtungen, Materialaufträgen und Temperaturangleichungen des Pulvers verlängert die Bauzeit und erhöht die Kosten (vgl. Abbildung 3-16).

Bauteile mit einer großen Masse können zudem im Bauprozess viel Wärme speichern. Die Teile kühlen nur langsam ab und die gespeicherte Wärme führt zu einem „Wachsen“, da anliegende Pulverpartikel an die Kontur anschmelzen (vgl. Kapitel 3.2.1.1). Bauteile mit kleinen Abmessungen kühlen hingegen zu schnell aus und können sich dabei verziehen [26].

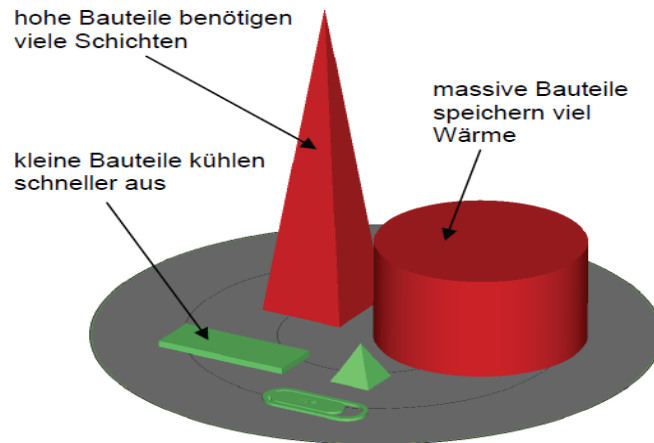


Abbildung 3-16: Probleme bei Teilen mit sehr großen und kleinen Abmessungen

3.1.4.4 Skalierung

Durch das Aufschmelzen des porösen Pulvermaterials im thermischen Bauprozess und dem folgenden Abkühlen findet eine Änderung der Pulverdichte statt. Die steigende Dichte durch Abnahme der Poren hat eine geringfügige Schrumpfung der beleuchteten Fläche zur Folge. Das ganze Bauteil schwindet um den Betrag Δx und Δy in der Ebene und um Δz in der Vertikalen.

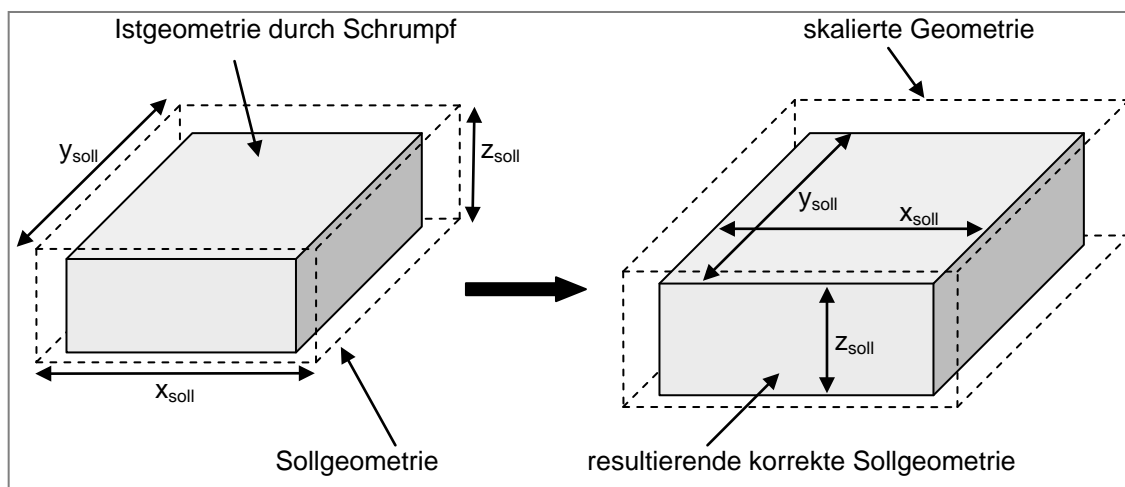


Abbildung 3-17: Kompensation der Schrumpfung durch Skalierung der Bauteilgeometrie

Maß- und Formhaltigkeit hängen hauptsächlich von diesem Effekt ab. Bei teilkristallinen Thermoplasten wie Polyamid beträgt die Schrumpfung ca. 3 bis 5 % [18].

Um dies auszugleichen, werden die CAD-Modelle vorher in allen drei Koordinatenrichtungen skaliert und somit mit (leichtem) Übermaß gebaut. Bei PA 12 beträgt die Skalierung in x- und y-Richtung ca. 3,3 %, in z-Richtung ungefähr 2,2 % [26].

Es ist erforderlich die Skalierungs- und Kompensationsfaktoren nach jedem Wechsel des Werkstoffes oder des Pulverzustandes sowie nach Änderungen der Prozessparameter erneut zu überprüfen.

3.1.4.5 Schichtdicke:

Die Schichtdicke D_S ist die Höhe einer jeden Pulverschicht und bestimmt maßgeblich die Qualität des Bauteils. Die minimal möglichen Schichtdicken sind werkstoffabhängig. Für die Werkstoffe der Sinterstation® 2000 liegen sie zwischen 0,08 und 0,15 mm.

Der Standardwert der Schichtdicke für das Material PA 12 beträgt 0,1mm, während die größte genutzte Dicke ist 0,15 mm. Es sind auch Höchstwerte von 0,3 mm möglich, jedoch wird bei den gebräuchlichen Werten für Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit V_S und Linienabstand h_S die hierfür nötige Energiedichte nicht erreicht. Die Festigkeit nimmt stark ab die Schichten lassen sich mitunter leicht auseinander nehmen. Zwar lassen sich die Parameter der Energiedichte zu größeren Werten ändern, eine Steigerung der Volumenenergie-dichte ist jedoch durch die Obergrenze der Flächenenergiedichte begrenzt (vgl. Kapitel 5.7 und Kapitel 5.10). Ab Schichtdicken von ca. 0,14 mm verfärben sich die Bauteile, sie werden gelblich.

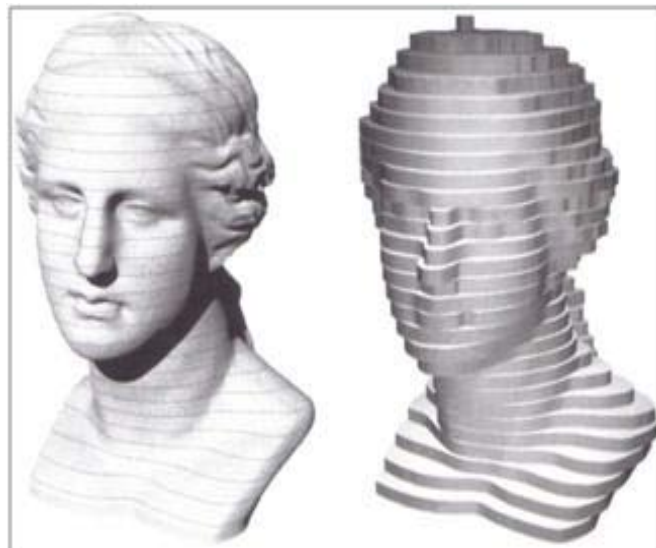


Abbildung 3-18: Stufige Oberfläche als Folge des Schichtbauverfahrens [12]

Je geringer die Schichtdicke im Bauprozess, desto feiner werden Details und desto weniger schlägt der Stufen- bzw. Treppeneffekt aus. Dieser tritt auf, da der Aufbau in z-Richtung durch Aufeinanderfügen von einzelnen Schichten mit bestimmter Dicke erfolgt. Sehr anschaulich wird es in Abbildung 3-18 verdeutlicht.

Die Büste mit ihren vielen Rundungen und feinen Details wird durch den Aufbau mit einer großen Schichtdicke sehr grob; es bilden sich deutliche Stufen aus. Durch eine Verringerung der Schichtdicke wird dieser Effekt in Richtung Original verschoben. Aus einer geringen Schichtdicke folgt aber auch eine kleinere Bauteilfertigungsgeschwindigkeit. Durch eine Halbierung der Schichtdicke wird unter der Konstanthaltung der anderen Parameter die Dauer der Bauphase verdoppelt.

Bauteilfertigungsgeschwindigkeit: $V_B = D_s / (t_s + t_p)$ [mm/s] Formel 3-1 [29]

Mit: t_s : Schicht-Sinterzeit; t_p : Die Zeit zum Auftragen von einer neuen Schicht.

Eine Differenz zur vorgegebenen Geometrie bleibt allerdings immer vorhanden. Rundungen sind einerseits durch die STL-Formatierung kantig geworden, Schrägen andererseits durch die senkrechten Seitenwände der Schichten generell nicht herstellbar. Es bleibt somit immer eine Abweichung von der Sollkontur.

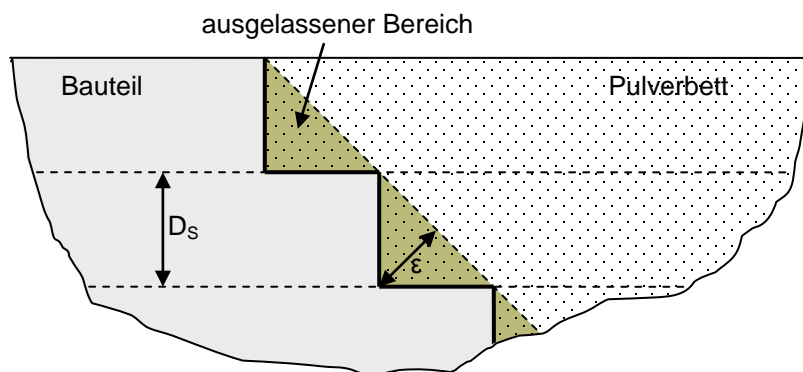


Abbildung 3-19: Abweichung ϵ an schrägen Flächen durch den Stufeneffekt

Der Abweichungsfehler ϵ ist von der Schichtdicke und dem Neigungswinkel der Schräge abhängig. Sein Wert liegt zwischen $0 \leq \epsilon < D_s$ [24]. Der Treppeneffekt wird durch eine Reduzierung der Schichtdicke allerdings nicht ausgeschaltet, lediglich die Abweichung von der anzunähernden Oberfläche wird geringer.

Eine geschickte Platzierung der Geometrie im Bauraum kann jedoch prinzipiell die Anzahl der schräg ausgerichteten Flächen reduzieren (vgl. Kapitel 3.1.4.6).

Neben dem Stufeneffekt gibt es weitere mögliche Fehler. Oberflächen, die parallel zu den Schnittebenen des Körpers liegen, werden je nach Lage zu groß oder überhaupt nicht gebaut. Bei einer nach oben gerichteten Fläche wird zu wenig Material versintert, bei einer nach unten gerichteten zu viel [24] (vgl. Abbildung 3-20).

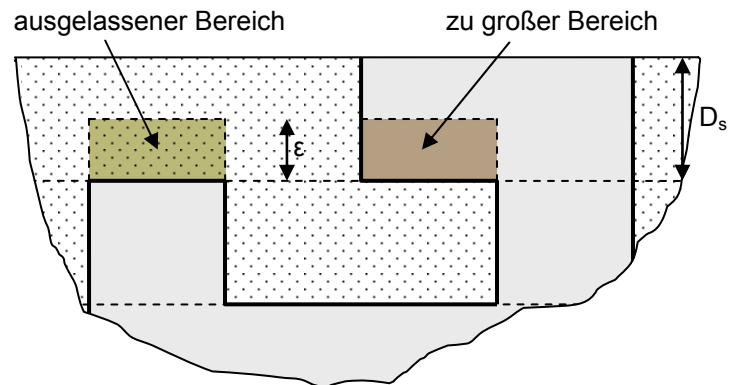


Abbildung 3-20: Abweichung ϵ an ebenen Körperoberflächen

Ist keine Toleranz gegeben ($\epsilon = 0$), muss die Geometrie genau auf der Höhe einer solchen ebenen Fläche geschnitten werden. Mit konstanten Schichtdicken ist es aber kaum möglich, dass alle ebenen Oberflächen in den Schnittebenen liegen.

Um eine Balance zwischen Genauigkeit und Bauzeit zu erreichen, kann die Schichtdicke in vertikaler Richtung variiert werden. Einzelne Schichten bzw. Bauteilbereiche in z-Richtung lassen sich somit mit kleinen oder großen Schichtdicken bauen. Beispielsweise lassen sich viele kleine Schichtdicken eines geradlinigen Elementes, ohne von seiner Geometrie oder Exaktheit abzuweichen, zu wenigen großen zusammenfassen, während Rundungen und Schrägen mit feinen Schichtendicken erstellt werden. Die Bauzeit kann somit je nach Geometrie des Bauteiles mitunter stark reduziert werden.

Bei einfachen Körpern kann dies manuell in der Maschinensteuerung eingestellt werden, für komplexe Bauteile kommen hingegen Algorithmen zum Einsatz. Das als Adaptive Slicing bekannte Verfahren ermittelt dabei Konturdivergenzen zwischen zwei aufeinander folgenden Schichten. Daraus lassen sich Veränderungen der Schichtdicken und Variationen der Scanstrategie ableiten [30].

Folgendes Beispiel demonstriert die Vorteile des Adaptive Slicing. Das bereits bekannte Bauteil „Lesezeichen“ wurde einmal mit einer konstanten Schichtdicke erstellt, ein weiteres Mal mit Schichten variabler Dicke. Um die Ergebnisse an großen Rundungen besser demonstrieren zu können, ist das Bauteil stehend im Bauraum platziert, entgegen den Vorgaben aus dem nachfolgenden Kapitel 3.1.4.6. Die eingesetzte maximale Schichtdicke betrug 0,2 mm, die minimale (konstante) Schichtdicke 0,1 mm und der Fehler ϵ maximal 0,1 mm. Des Weiteren wurden die aus Kapitel 3.1.4.4 bekannten Skalierungsfaktoren angewendet (vgl. Abbildung 3-21).

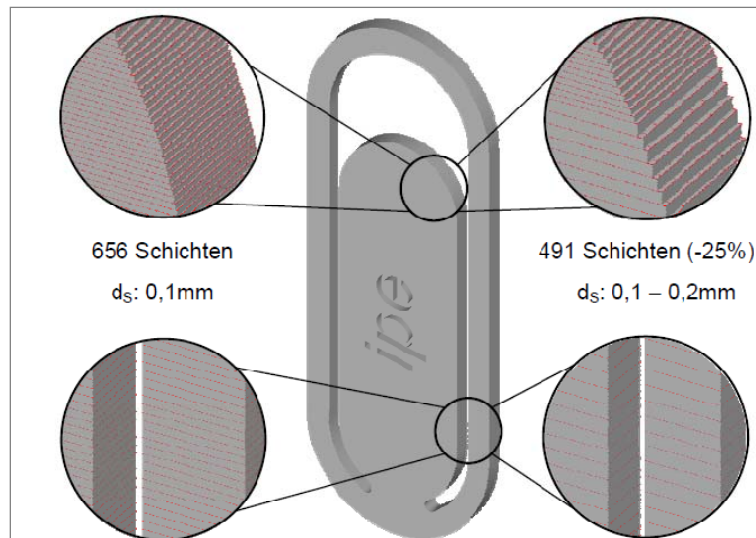


Abbildung 3-21: Konstante Schichtdicke (links) und variable Schichtdicke (rechts)

Die beiden linken Vergrößerungen zeigen den Bau mit Standardeinstellungen, in den rechten ist er mit variablen Werten dargestellt. Im Bereich der Rundung ist deutlich eine Veränderung zu erkennen. Die variablen Schichtdicken wurden, unter Beachtung von ε , dem Grad der Rundung angepasst. Die vertikalen Segmente im mittleren Abschnitt konnten mit der maximalen Dicke gebaut werden (ausgenommen im Bereich des Schriftzeichens), da hier keine Rundungen oder Schrägen berücksichtigt werden mussten.

Eine Fertigung mit 656 Schichten konstanter Dicke (0,1 mm) konnte durch das Adaptive Slicing um 165 Schichten reduziert werden, das Einsparungspotential beträgt somit 25 %. Damit geht eine große Verkürzung der Bauzeit einher, da die nötige Dauer für Materialauftrag, Temperaturanpassung des kälteren Frischpulvers und Belichtung für die verringerten 165 Schichten entfällt. Bei einem Bau ohne Schriftzeichen wurden 220 Schichten eingespart (33,5 %).

Der Umfang der möglichen Schichtreduzierung ist abhängig von der Geometrie des Bauteils sowie der erlaubten Toleranz ε . Das Ergebnis lässt sich daher nicht direkt auf andere Körper und Bauprozesse übertragen. Es zeigt aber deutlich das Potential des Adaptive Slicing und damit die Verkürzung der Fertigungszeit.

Eine Weiterentwicklung durch das Fraunhofer IPK zum Segment Based Adaptive Slicing analysiert zusätzlich die Geometrie des Bauteils. Diese wird dabei in einzelne Segmente aufgeteilt, die unabhängig voneinander behandelt werden. Auch Bereiche mit sehr geringer Wandstärke oder Materialanhäufungen lassen sich in einzelne Bereiche einteilen und unterschiedlich bearbeiten [30].

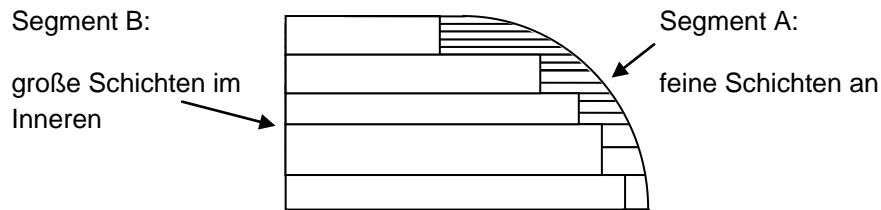


Abbildung 3-22: Veränderliche Schichtdicken und Scanstrategien für einzelne Segmente [74]

In Segment A wird die Schichtdicke wie beim Adaptive Slicing der Krümmung angepasst. Das innere Segment B dagegen wird mit der maximal möglichen Schichtdicke gebaut, da diese dort keinen Einfluss auf die Geometrie hat.

Hier kommen die bereits erwähnten Änderungen der Belichtung zum Einsatz, da eine Änderung der Schichtdicke nur in z-Richtung möglich ist, nicht aber in der horizontalen. Die großen Schichten im Inneren bestehen daher aus mehreren Schichten variabler Dicke, entsprechend denen in Segment A. Sie werden jedoch nicht in jeder Schicht belichtet, sondern erst gemeinsam nach einer bestimmten Höhe, spätestens mit Erreichen der maximal zu bearbeitenden Dicke. Dies bedeutet eine Reduzierung des Lasereinsatzes in Segment B, womit eine Senkung der Bearbeitungszeit der entsprechenden Schichten einhergeht.

Im IPK Fraunhofer wurde diese Technik an einer Stereolithographieanlage mit Schichtdicken zwischen 0,1 und 0,7 mm erprobt. Die Ergebnisse waren viel versprechend und die Bauzeit wurde signifikant reduziert.

Des Weiteren kommt es beim LS durch die Bearbeitung mit dem Laser zur einer Materialverdichtung. Als Folge dafür wird die Schichtdicke um den Betrag D^* verringert. Dadurch erhöht sich die Dicke der nächsten zu bearbeitenden Schicht auf den Betrag D'_S , so dass nach einer Anzahl von ca. 6 -10 bearbeiteter Schichten eine konstante Schichtdicke von ca. $1,6D_S - 2D_S$ erreicht wird [31].

$$D^* = D_S \times (1 - a) \quad \text{Formel 3-2}$$

$$D'_S = D_S + D^* \quad \text{Formel 3-3}$$

a: Füllfaktor der Pulverschicht

3.1.4.6 Platzierung im Bauraum

Die zu fertigenden Bauteile werden als STL-Dateien in die Bauprozess-Software der verwendeten Sinteranlage geladen. Diese zeigt einen virtuellen Bauraum an, in dem die Teile platziert und in allen drei Koordinatenrichtungen ausgerichtet werden. Der

virtuelle Bauraum stellt Bauraum und Bauteile in ihrer Anordnung so dar, wie sie im späteren Bauprozess erstellt werden.

Theoretisch können Bauteile in jeder Lage und beliebig im Bauraum positioniert bzw. gebaut werden. Praktisch gibt es aber Merkmale, die beachtet werden sollten.

Die Prozesszeit hängt weitestgehend von der Anzahl der Schichten bzw. von der absoluten Höhe der Bauteile ab. Um Zeit und damit auch Kosten einzusparen, empfiehlt es sich, diese Höhe minimal zu halten. Bauteile sollten folglich am Boden positioniert werden und, wenn möglich, die geringste Bauteilhöhe vertikal ausgerichtet sein. Benötigte das Bauteil „Lesezeichen“ in vertikaler Ausrichtung im vorhergehenden Kapitel 3.1.4.5 noch 664 Schichten, sind es liegend nur 22.

Eine möglichst kompakte Anordnung der Bauteile ist von Vorteil. Sie kann vom Benutzer manuell im virtuellen Bauraum vorgenommen werden oder von der Anlagensoftware automatisch erfolgen. Diese orientiert sich dabei an der das Bauteil umgebenden Bounding Box, mit deren Hilfe Kollisionen vermieden werden. Neuere Systeme analysieren zusätzlich die Bauteilgeometrien und können Teile auch ineinander verschachteln [30](vgl. Abbildung 3-23).

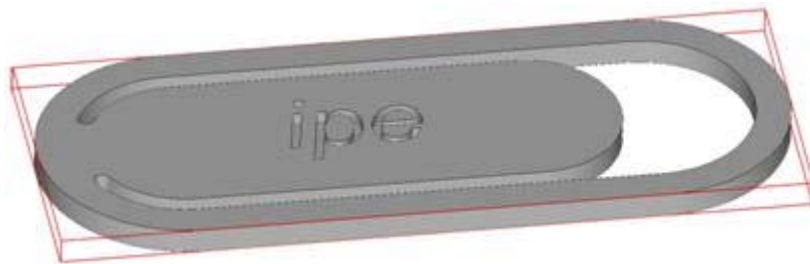


Abbildung 3-23: Bounding Box

Ein weiterer wichtiger Aspekt erschließt sich aus der Eigenschaft der generativen Fertigung, dem Schichtaufbau. Da es an Schrägen und Rundungen zu Stufeneffekten kommt, sollten Ebenen oder wichtige geradlinige Elemente horizontal oder vertikal ausgerichtet sein.

Die Platzierung bzw. Orientierung der Bauteile im Bauraum ist auch geometrieabhängig. Z. B. empfiehlt es sich für Rechtecke die längste Seite in X-Richtung entlang der Bewegungsrichtung der Auftragswalze auszurichten. Dadurch wird dieser ein geringerer Widerstand geboten, da das versinterte Material der Bauteile vor dem Erstarren eine leichte Klebrigkeit aufweist, die beim Auftrag der nachfolgenden Schicht hinderlich sein kann(vgl. Abbildung 3-24).

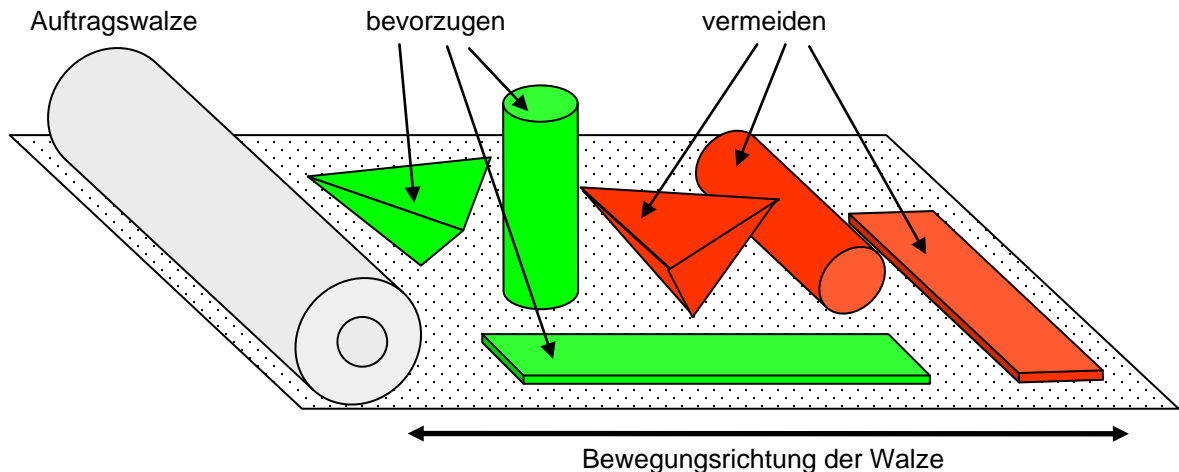


Abbildung 3-24: Ausrichtung von Rechtecken, Tetraedern und Zylindern im Bauraum

Zylinder werden am besten in vertikaler Lage gebaut, da so der Stufeneffekt verhindert wird. Sollte ein Zylinder dennoch horizontal gebaut werden müssen, gilt die gleiche Vorgabe wie bei Rechtecken: in x-Richtung. Tetraeder hingegen sollten mit keiner Kante parallel zur Walze ausgerichtet sein. Dies reduziert den Widerstand beim Pulverauftrag und verhindert ein Verschieben des Bauteils. Der rote Tetraeder in der Abbildung 3-24 ist demnach falsch ausgerichtet, der grüne korrekt [26].

Die erste versinterte Schicht am Anfang des Bauteils oder am Beginn von Überhängen ist aufgrund der fehlenden Haftung zu einer darunter liegenden Schicht schlechter als die folgenden (vgl. Kapitel 3.1.4.2). Eine Fläche mit geforderter hoher Güte sollte deshalb nach oben ausgerichtet werden.

Sicherlich lassen sich nicht alle Platzierungsvorgaben in einem Bauteil vereinigen. Für jedes Teil muss daher einzeln entschieden werden, welche geforderte Eigenschaft am wichtigsten ist. Das können glatte Oberflächen, eine hohe Festigkeit oder eine möglichst schnelle Bauzeit sein. Daraus schließt sich die Lage im Bauraum.

3.2 Materialeigenschaften

3.2.1 Thermische Eigenschaften

Der Abschnitt „thermische Eigenschaften“ umfasst die Bereiche Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Sie bestimmen das Vermögen des Pulvermaterials, thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren und zu speichern.

3.2.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ_t des Pulvermaterials ist eine bedeutende Eigenschaft beim Laser-Sintern. Zusammen mit dem Absorptionsverhalten bestimmt sie die erreichbare Baugeschwindigkeit und die einzubringende Energie des Laserstrahls. Eine gerin-

ge Wärmeleitfähigkeit verhindert einen Wärmeabfluss im Pulver und begrenzt das Schmelzbad örtlich. Dadurch wird ein „Wachsen“ des Bauteils vermieden, bei dem nicht zum Bauteil gehörende Pulverpartikel über die Wärmeleitung thermisch aktiviert und an die Kontur angeklebt werden. Das Bauteil wird so mit einer Art Pelz versehen und geometrisch ungenau (vgl. Abbildung 3-25). Durch diesen Effekt ist auch die Aushärtebreite etwas größer als der Fokusbereich des Laserspots. Die Neigung zum Wachsen wird durch das Verhältnis zwischen eingebrachter Energie und Wärmeleitfähigkeit λ_t des Pulvers beeinflusst. Hohe Leitfähigkeiten hingegen begünstigen Spannungen sowie Verzüge und Risse in den Bauteilen.

Bei DuraForm PA von 3D Systems beträgt die Wärmeleitfähigkeit 0,07 W/mK [32]. Die Leitfähigkeit des gesinterten Materials ist aufgrund seiner gestiegenen Dichte im Bauprozess etwas höher als die des Pulvers.

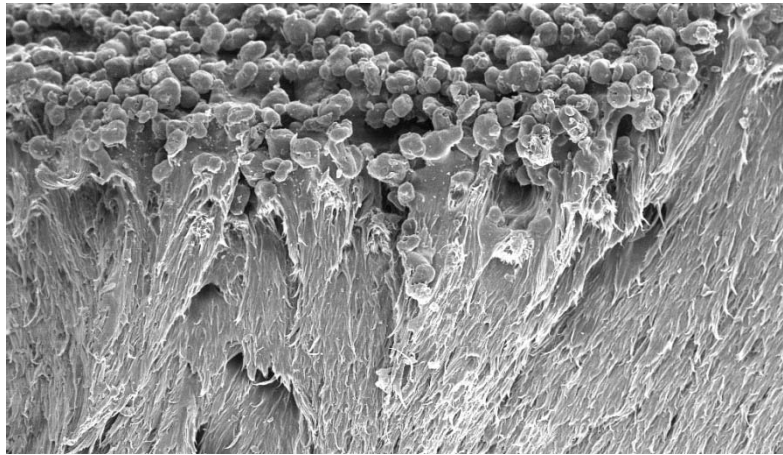


Abbildung 3-25: Anhaftung von Pulverpartikeln an den Bauteiloberflächen

Da Pulverschüttungen keinen homogenen Werkstoff darstellen, ist ihre Wärmeleitfähigkeit nur mit gewissen Ungenauigkeiten zu ermitteln. Durch die unregelmäßige Porosität des Pulvers und die für die Messtechnik nötigen adiabaten Randbedingungen sind Messungen sehr aufwändig. Die Dichte ist nicht konstant und die Gesamtwärmeleitfähigkeit λ_t hängt primär von der Wärmeleitfähigkeit der Partikel λ_P , der des den Hohlraum füllenden Fluids λ_F (Stickstoff) und der Schüttungsporosität ψ ab. Hinzu kommen weitere, sekundäre Einflüsse. Die Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Schüttungen können daher signifikante Unterschiede aufweisen [18].

$$\lambda_t = f \left[\underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_F \\ \psi \end{bmatrix}}_{\text{primär}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \text{Druck} \\ \text{Partikelgröße} \\ \text{mech. + opt. Eigenschaften der Partikel} \\ \text{Partikelabflachung} \\ \text{thermodyn. + opt. Eigenschaften des Fluids} \\ \text{Partikelform, Partikelgrößenverteilung} \end{bmatrix}}_{\text{sekundär}} \right]$$

Abbildung 3-26: Primäre und sekundäre Einflüsse der Wärmeleitfähigkeit λ_t [18] [75]

3.2.1.2 Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität C_P ist ein Maß für die Wärmemenge ΔQ , die nötig ist, um Pulvermaterial mit der Masse m um 1 K zu erwärmen.

Der C_P -Wert von DuraForm PA beträgt 1,64J/gK [32].

Mit der spezifischen Wärmekapazität C_P lässt sich die für den Bauprozess wichtige Wärmemenge ΔQ errechnen. Ihre Herleitung ist wie folgt aufgebaut:

$$\Delta Q = m \times C_P \times \Delta T \quad \text{Formel 3-4}$$

Die Masse m des Pulvers ist in Gramm einzusetzen, die spezifische Wärmekapazität des Werkstoffes in J/gK und die Temperaturdifferenz zwischen Pulvertemperatur und Schmelztemperatur des Materials in Kelvin. Die resultierende Wärmemenge ΔQ in Joule ist die Energie, die vom Laser zur schmelzenden Bearbeitung des Werkstoffes aufgebracht werden muss.

Die obige Formel für die Wärmekapazität ist jedoch nur bei konstantem Druck (Umgebungsdruck) anwendbar, da C_P druckabhängig ist. Des Weiteren ist bei der spezifischen Wärmekapazität von Pulverwerkstoffen zusätzlich der Massenanteil des das Pulver umgebenden Fluids (Stickstoff) zu berücksichtigen, auch wenn dieser typischerweise vernachlässigbar gering ist [18].

3.2.2 Optische Eigenschaften

Die optischen Eigenschaften beschreiben die Wechselwirkung des Laserstrahls mit dem Pulvermaterial.

Je nach Werkstoff wird ein bestimmter Teil der Laserstrahlung an der Pulveroberfläche reflektiert. Der Rest wird absorbiert und auch transmittiert, sollte die Eindringtiefe größer als die Schichtdicke sein.

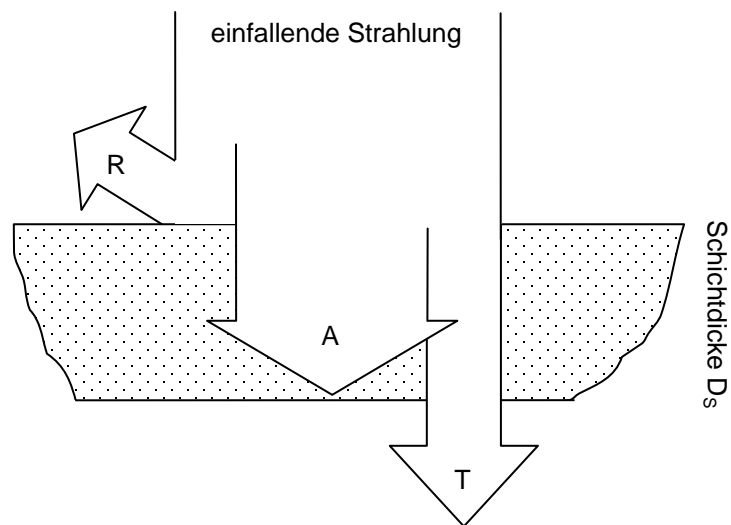


Abbildung 3-27: Reflexion R, Absorption A und Transmission T der Strahlung im Pulver

Beim Laser-Sintern hängt das Bearbeitungsergebnis wesentlich von der pro Zeiteinheit im Werkstück absorbierten Energie ab. Die Absorption A beschreibt das Verhältnis von eingekoppelter Leistung zu der auf das Werkstück auftreffenden Leistung.

$$A = \frac{P_{abs}}{P_L} \quad \text{Formel 3-5}$$

Die Absorption ist keine reine Materialeigenschaft. Sie hängt unter anderem von den physikalischen Eigenschaften des Laserstrahles, den Umgebungsbedingungen und den Eigenschaften der Oberflächen ab [21].

A kann dementsprechend Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je höher ihr Betrag, desto mehr Energie wird zum Erwärmen des Pulvers genutzt.

Je höher der Absorptionsgrad, desto geringer ist die Transmission T bzw. die Eindringtiefe der Strahlung. Ein CO₂-Laser erzielt bei Kunststoffen Werte von nahezu 100%. Ist die Absorption zu niedrig, führt es zu Einschränkungen beim Sintern großer Schichtdicken sowie der Verbindung zwischen den Schichten. Beim Eintritt in die Schmelze wird Polyamid jedoch transparent, wodurch sich die Anteile der Absorption A, Reflexion R und Transmission T etwas verschieben [27].

Weiterhin lässt sich der Absorptionsgrad A des Materials erhöhen, indem parallel oder zirkular polarisiertes Licht unter Schrägeinfall auf der Pulveroberfläche auftritt, insbesondere unter einem hohen Einfallswinkel. Die Abbildung 3-2 stellt das Verhältnis von Wellenlänge λ und Absorptionsgrad A bei senkrechtem Strahleinfall dar. Bei parallel zur Einfallsebene polarisiertem Licht existiert ferner ein Winkel, der

Brewsterwinkel α_B , bei dem keine Reflexion mehr auftritt. Dieser Effekt wird vorwiegend bei Werkstoffen mit einem niedrigen Absorptionsgrad ausgenutzt [18].

3.2.3 Pulvermaterial

Die Auswahl des Ausgangsmaterials erfolgt bei allen RP-Verfahren größtenteils nicht produktorientiert, also auf die gewünschten Eigenschaften des Modells abgestimmt, sondern vielmehr prozessorientiert, da die einzelnen Verfahren nur für bestimmte Werkstoffen ausgelegt sind und nur wenig Variation zulassen [33].

Verfahrensbedingt lassen sich beim LS nur schmelzbare pulverförmige Werkstoffe verarbeiten, wie Thermoplaste und Metalle. Vor allem die niedrige Schmelztemperatur der Thermoplaste begünstigt die Bearbeitung.

3.2.3.1 Pulverauftrag

Der Pulverauftrag wird von einer Beschichtungs- oder Auftragseinheit durchgeführt, die Frischpulver aus dem hochgefahrenen Vorratsbehälter zum Bauraum transportiert und es dort zu einer neuen Schicht verteilt. Überschüssiges Pulver wird am Ende in einem Überlauf aufgenommen.

Damit sichergestellt ist, dass ausreichend Material auf der Bauplattform aufgetragen wird, muss der Vorratsbehälter genügend Pulver bereitstellen und entsprechend weit nach oben fahren (vgl. Kapitel 5.6).

Zur Verteilung des Pulvers kommt je nach Hersteller eine Walze (DTM Sinterstation® 2000 und 2500) oder ein Rakel zum Einsatz.



Abbildung 3-28: Pulverauftrag der DTM Sinterstationen mittels Walze

Die Walze dreht sich beim Pulverauftrag entgegengesetzt der Laufrichtung der Beschichtungseinheit. Daraus resultiert eine gleichmäßige Pulverschicht und es werden keine Kräfte auf das Pulverbett übertragen. Bei gleicher Drehrichtung besteht dagegen die Gefahr, dass Pulver unter die Walze gedrückt wird und Bauteile verschoben

werden (Abbildung 3-29a). Eine solche Verschiebung kann auch durch verzogene Bauteile (vgl. Kapitel 3.1.4.2) auftreten. Diese durchbrechen die Pulveroberfläche und ragen aus dieser heraus, wodurch sie von der Walze erfasst werden (Abbildung 3-29b) [27].

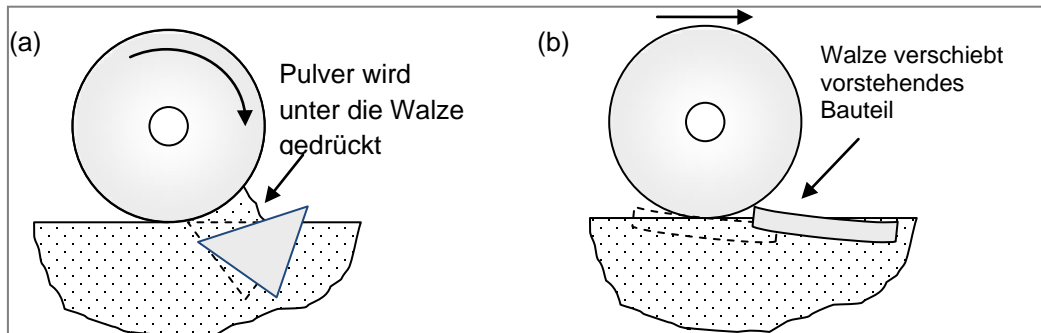


Abbildung 3-29: Verschiebung von Bauteilen durch die Pulverauftragswalze(in Anlehnung an [27])

Die Sinterstationen[®] DTM 2000 und 2500 besitzen zwei Pulvervorratsbehälter, auf jeder Seite der Bauplattform einen. Dadurch ist die Richtung des Pulverauftrags alternierend, was ein schnelleres Neubeschichten der Bauplattform erlaubt.

3.2.3.2 Pulverzustand

Obwohl beim Lasersintern der komplette Bauraum mit Pulver gefüllt ist, wird meist nur ein kleiner Teil versintert, der übrige Rest bleibt ungenutzt. Dieses Material steht daher nachfolgenden Prozessen zur Verfügung.

Bei der häufigen Wiederverwendung des Pulvers tritt aber eine Pulverschädigung auf, da es im Bauprozess thermisch altert, wodurch sich die Fließfähigkeit, die Verschmelzung der Partikel und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile verschlechtern. Diese hängt mit der Porosität sowie der mikroskopischen Struktur des Bauteils zusammen, die ebenfalls Gegenstand von Änderungen sind. Aufgrund von REM-Aufnahmen und mikroskopischen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass das anfänglich hauptsächlich kristalline Gefüge sich zunehmend in amorphe Strukturen umwandelt, die durch die „ungeordnete“ Anordnung der Moleküle weniger gut Kräfte aufnehmen können und somit zu einer abnehmenden Festigkeit führt. Die soeben beschriebenen Phänomene werden allgemein unter der Bezeichnung Alterung zusammengefasst und sind im Umgang mit LS-Anlagen vergleichsweise leicht zu beobachten. Um die Folgen abzumildern, wird das bereits eingesetzte Pulver in der Regel mit Frischpulver aufgefrischt. Ein Vorteil ist, dass auf diese Weise materialabhängige Fertigungsparameter, wie beispielsweise Skalierungswerte, über lange Zeit konstant bleiben und das Pulver häufig, mit zufriedenstellenden Ergebnissen, wiederverwendet werden kann [27].

Bei Polyamid liegt die Recyclingrate erfahrungsgemäß zwischen 30 und 50 %, abhängig von der Schädigung des Altpulvers.

Frischpulver fließt gleichmäßig, einer Flüssigkeit ähnlich, während gebrauchtes Pulver zusammenhaftende Segmente bildet, die blockweise fließen. Auch das Aufschmelzverhalten und die erreichbare Oberflächenqualität werden vom Alterungszustand des Pulvers bestimmt. Dieser wiederum hängt von dem Maß der Wiederverwendung des Materials ab [27].

A. Sauer hat mehrere Versuche zur Festigkeit von Neu- und Altpulver gemacht. Er stellte fest, dass Polyamid als Frischpulver eine etwas geringere Festigkeit aufweist als benutztes Pulver nach dem ersten Sinterdurchgang. Die Ursache dafür ist, dass das gebrauchte Material inhomogener wird und sich die Partikelgrößenverteilung dadurch verbessert, sodass die Zugfestigkeit R_m steigt. Bei weiterem Gebrauch steigt der Anteil amorpher Strukturen gegenüber den kristallinen, die Festigkeit des Werkstoffes nimmt ab. Ab der ersten Wiederverwendung findet daher eine (fast lineare) Abnahme der erreichbaren Festigkeit statt. Nach siebenmaliger Verwendung ist noch ein Wert von $47,7 \text{ N/mm}^2$ erreichbar, der im Bereich der Herstellerangaben für Frischpulver liegt. Damit kann das Pulver in bis zu sieben Durchläufen verwendet werden.

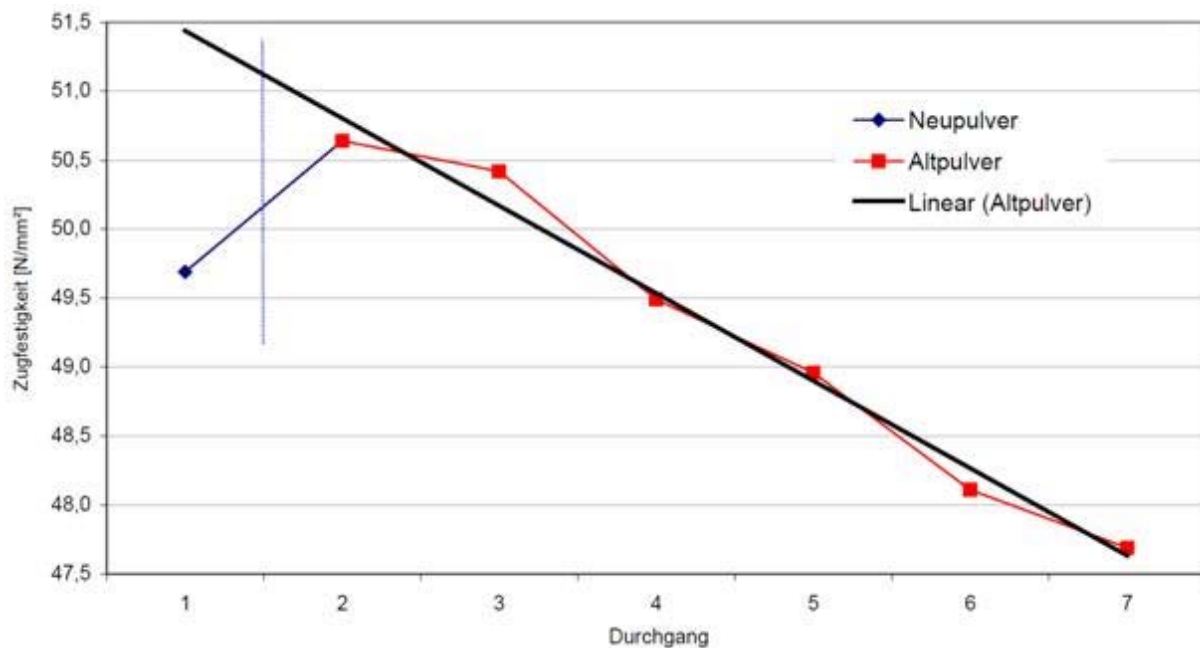


Abbildung 3-30: Zugfestigkeit von Neu- und Altpulver nach mehreren Durchgängen [27]

3.2.3.3 Korngröße

Die beim Lasersintern verwendete Korngröße d_K des Pulvers liegt zwischen 20 und 100 μm [12]. Bei DuraForm PA 12 beträgt die mittlere Korngröße 58 μm [34].

Durch die Korngröße ist die minimal mögliche Schichtdicke im Bauprozess bestimmt. Neupulver besitzt allerdings keine einheitliche Partikelgröße. Im Mittel entspricht sie den Herstellerangaben, unterliegt aber Schwankungen.

Durch die wiederholte Verwendung des Pulvers in weiteren Bauprozessen ändert sich die Verteilung, der Anteil größerer Körner nimmt zu und der Anteil von kleineren Körnern sinkt. Dies ist eine Folge der geringeren Schmelzenergie kleiner Körner; sie verbinden sich früher mit den umliegenden Teilchen. Dazu trägt auch schon die Aufwärmung des Pulvers durch die Heizungen der Bauplattform und des Bauraums bei, ohne dass der Laser es bearbeitet hat [27].

Die Änderung der Partikeldurchmesser hin zu größeren Körnern wirkt sich auf die erreichbare Packungsdichte des Pulvers aus.

Die Packungsdichte, auch relative Dichte, ist das Verhältnis des Volumens der Pulverpartikel in einem definierten Raum zum Gesamtvolumen des Raumes. Ihr kommt ebenfalls eine wesentliche Bedeutung im Prozess zu.

Sie beeinflusst das Ausmaß der Schrumpfung, die Dynamik des Schmelzbades sowie den Energietransport in der Pulverschüttung über die Kontaktflächen der Körner. Die feineren Pulverpartikel garantieren eine größere Energieabsorption bzw. größeren Sintergrad [35]. Die übliche Annahme ist, dass die Partikel kompakt sind und eine definierte Größe besitzen. Diese ist in der Regel durch den Durchmesser d_K beschrieben. Der Vorteil (idealer) kugelförmiger Körner ist, dass sie eine relativ geringe Reibung untereinander aufweisen und hohe Packungsdichten ermöglichen. Bei einer geordneten Packung mit einheitlich großen Kugeln liegt diese Dichte bei 74 %, bei einer ungeordneten Pulverschüttung mit ebenfalls einheitlich großen Kugeln nur bei 64 % [18].

Die in der Praxis eingesetzten Pulver unterscheiden sich durch die oben genannten Vorgänge aber vom idealen Zustand, Größe und Form variieren durch die Agglomeration der Partikel. Altpulver aus früheren Prozessen hat durch die vergrößerten Körner eine geringere Packungsdichte als Frischpulver. Mit Abnahme der kleineren Pulverkörner bleiben die Lücken zwischen den großen Partikeln ungefüllt. Dadurch nimmt auch die Oberflächenqualität der Bauteile ab [27].

3.3 Die Anlage

3.3.1 DTM Sinterstation® 2000 / 2500

Alle Probekörper für die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden mit einer Sinterstation® DTM 2000 oder mit DTM 2500 hergestellt. Die Sinterstation® 2000 ist als die erste industrielle Lasersinter-Anlage von DTM Corporation auf den Markt gebracht worden. Inzwischen wurde die DTM Corporation von 3D Systems übernommen, die rechtlich geschützte Bezeichnung *Selective Laser Sintering* findet dort nachwievor Verwendung [34].

3.3.2 Aufbau

Das Herzstück der Sinterstation® 2000 bildet die Prozesskammer selbst, in der sich die runde Bauplattform mit einem Durchmesser von 305 mm, von denen jedoch nur ca. 250 mm effektiv nutzbar sind (vgl. 3.1.3.2.4), befindet. Links und rechts der Bauplattform befinden sich die Vorratsbehälter, die bei einer Füllung mit Pulver eine maximale Bauhöhe von ca. 380 mm erlauben. An der seitlichen Begrenzung der Prozesskammer befindet sich jeweils ein Überlaufbehälter, in den überschüssiges Pulver gelangt, nachdem die Transportwalze es über die Bauplattform und den gegenüberliegenden Vorratsbehälter bewegt hat. Abbildung 3-31 illustriert den prinzipiellen Aufbau der Prozesskammer und anderer Maschineneinheiten.

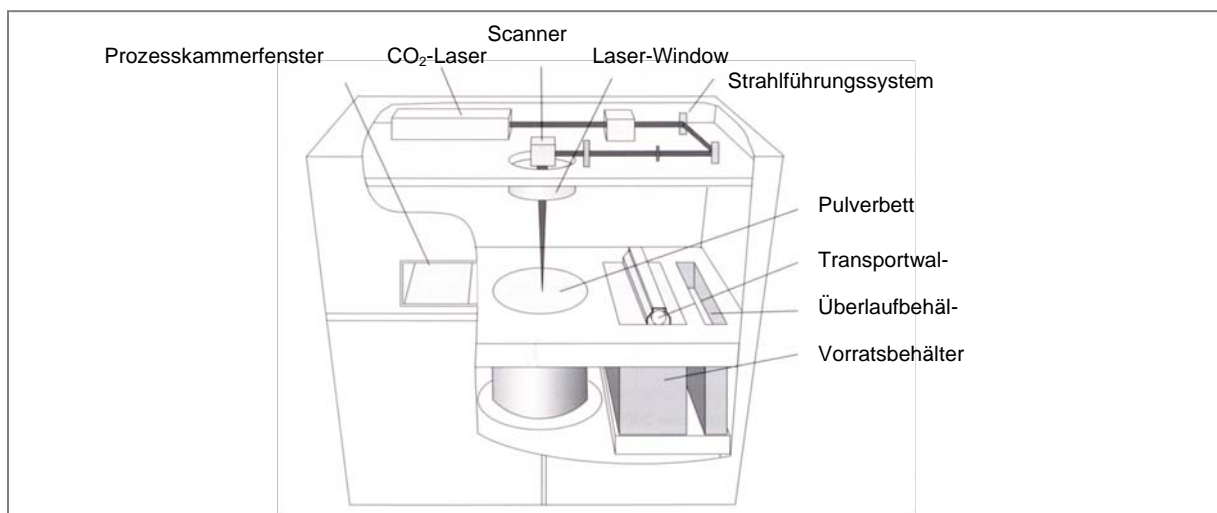


Abbildung 3-31: Prinzipieller Aufbau der DTM Sinterstation® 2000

Der prinzipielle Aufbau der Sinterstation® DTM 2500 ist mit dem der Sinterstation® DTM 2000 bis auf die rechteckige Plattform weitgehend identisch. Es kann aber mit der Sinterstation® DTM 2500 dank ihres größeren Bauraums wesentlich größere Bauteile (bis 320 x 270 x 300)mm gebaut werden.

Wie aus Abbildung **3-31** ersichtlich ist, liegt das Scannersystem zur Steuerung des Laserstrahls oberhalb der Prozesskammer und ist von dieser abgeschirmt. Der Laserstrahl tritt durch Zink-Selenit-Glas, das so genannte *Laser-Window*, in die Prozesskammer ein und wird durch zwei Drehspiegel im Scanner auf das Pulverbett gelenkt.

Über der Bauplattform, sowie den Vorratsbehältern befinden sich jeweils Infrarotheizungen, die das Pulver erwärmen, um den Energieeintrag durch den Laser so gering wie möglich zu halten. Insgesamt sind die Sinterstationen[®] DTM 2000/2500, entgegen ihren Nachfolgemodellen, sehr schwer und massiv ausgelegt, was eine gleichmäßigere, aber auch längere, Cooldown-Phase bedingt. Neuere Maschinen sind thermisch wesentlich dynamischer ausgelegt, um Prozesszeit zu sparen und somit die Effizienz zu steigern [34].

Da der gesamte Prozess, zum Schutz vor Oxidation der Bauteile und Schutz vor einer Pulverexplosion, unter einer Inertgasatmosphäre stattfinden muss, verfügt die Sinterstation[®] 2000 über eine Vorrichtung zur Flutung des Bauraumes mit Stickstoff. Dieser wird ebenfalls, im so genannten *Downdraft* zur gleichmäßigen Erwärmung des Pulvers verwendet, indem der Stickstoff durch die Bauplattform abgesaugt wird. Als Laserstrahlquelle dient in der DTM Sinterstation[®] 2000 ein 50 W CO₂-Laser der Firma Synrad vom Typ 48-5 mit Wasserkühlung.

3.3.3 Einsetzbare Werkstoffe

Die Firma 3D Systems bietet für die Sinterstation[®] DTM 2000/2500, je nach Anwendung, verschiedene Werkstoffe oder Werkstoffkombinationen unter den Markennamen DuraForm[®] und CastForm[™] an. Die thermoplastischen Kunststoffe der DuraForm[®]-Familie sind je nach Anwendung zur Erzielung bestimmter Bauteileigenschaften noch mit anderen Materialien gefüllt. Tabelle 3-2 gibt einen kurzen Überblick über die angebotenen Materialien und deren Anwendungen.

Neben der DuraForm[®] Material-Familie, bietet 3D Systems für die beiden Sinterstationen auch polymergebundene Metalle und Formsande für den Formguss und den Werkstoff CastForm[™] zur generativen Herstellung von Feingussmodellen an. Dabei handelt es sich um eine Kombination von Polystyrol und Wachs, die sich während des Gießereiprozesses, wie traditionelle Gießereiwachse, ausschmelzen las-

sen. Sie erlauben also die Herstellung von komplexen Gussteilen ohne aufwändige Toolingprozesse [39].

Werkstoff	Eigenschaften/Anwendung
DuraForm® Flex [36]	Elastischer Kunststoff mit guter Resistenz gegen äußere Einflüsse / Prototypen oder Kleinstserien von Schläuchen, Dichtungen, Verschlüssen, usw.
DuraForm® AF [37]	Aluminium gefüllter Verbundwerkstoff mit guter Haltbarkeit und Aussehen von Aluminiumguss / Prototypen oder Kleinstserien von „Look and Feel“ Modellen
DuraForm® PA [32]	Robuster Polyamidwerkstoff mit guter chemischer Beständigkeit / Funktionsprototypen oder Kleinstserien von Gehäusen, Schnappverschlüssen
DuraForm® GF [38]	Glasgefüllter Polyamidwerkstoff mit sehr hoher mechanischer Steifigkeit / Prototypen oder Kleinstserien von Gehäusen mit hoher Steifigkeit

Tabelle 3-2: DuraForm- Materialien für die Sinterstation® 2000/2500

Neben den Kunststoffen für das Laser-Sintern der Firma 3D Systems bieten noch die EOS GmbH und Exceltec vergleichbare Ausgangsmaterialien an.

Zur Herstellung aller Testkörper für die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit wurden ausschließlich aufgefrischte PA12-Pulvermischungen eingesetzt. Dabei wurde für eine Versuchsreihe immer dieselbe Mischung benutzt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Als Polyamide (PA) werden polymere Stoffe bezeichnet, die in ihren Kettenmolekülen in stetiger Reihenfolge die Amidgruppe (-NH-CO-) enthalten. Zur Unterscheidung der Polyamide wird dem Gattungsnamen PA im Falle eines Ausgangsstoffes die Anzahl der Kohlenstoffatome zwischen jeweils zwei, in der Polymerkette aufeinanderfolgenden Stickstoffatomen angehängt [40]. Z. B. entsteht durch die Polymerisation das Polylauro lactam (Polyamid 12) mit der Strukturformel $[-NH-(CH_2)_{11}-CO-]$. Verglichen mit anderen Polyamiden besitzt es mit $1,03 \text{ g/cm}^3$ die geringste Dichte und die kleinste Neigung zur reversiblen Aufnahme von Wasser aus der Umgebung (Hygroskopie) [41] [42].

Durch eine hohe Festigkeit erlaubt es die Herstellung von Bauteilen die großer Reibung ausgesetzt sind, wie beispielsweise Zahnräder oder Funktionsprototypen mit zum Teil stark belasteten Modellteilen wie beispielsweise Verschlüssen [27].

4 Scanstrategien beim Lasersintern von Kunststoff

Im Gegensatz zu den materialsubtrahierenden Verfahren erfordern die generativen Verfahren das Auffüllen des Konturinneren. Die umfahrenen Flächen müssen ausgefüllt werden, um die Schicht eines Volumens zu erzeugen [24]. Die Erstellung des gewünschten Querschnittes einer Schicht lässt sich in zwei Phasen unterteilen, die Belichtung der Außenkontur mit der Konturgeschwindigkeit V_o (Outline Scan Speed) und einer Laserleistung P_o (Outlinelaser Power) und die der darin liegenden Innenbereiche mit der Geschwindigkeit V_s (Filllaser Scan Speed) und der Leistung P_f (Filllaser Power). Der sogenannte Filllaser überstreicht die Innenbereiche des Querschnitts und sorgt somit für den Zusammenhalt innerhalb der aktuellen Schicht und zur Vorherigen. Der nachfolgende Einsatz des Lasers (Outline-Laser) belichtet die Außenkontur, was nicht nur eine Option zur Verbesserung der Oberflächenqualität darstellt, sondern auch zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der RP-Bauteile beiträgt(vgl. Kapitel 5.3).

In welcher Weise der Filllaser über die Pulveroberfläche streicht, wird als Belichtungs- oder Scanstrategie, die je nach Systemhersteller und Einstellung der Anlage variieren kann, bezeichnet. Dabei hat die Scanstrategie maßgeblichen Einfluss auf den Energieeintrag in das Pulverbett und somit auf die Eigenschaften des Bauteils [18]. Daher bieten manche Systeme die Möglichkeit verschiedener Scanstrategien oder Scanoptionen, die je nach Anwendung und gewünschten Eigenschaften ausgewählt werden können.

Da die gesamte Prozesszeit nicht unwesentlich von der Einsatzdauer des Filllasers bestimmt wird, ist besonders dieser Gegenstand von Forschung und Entwicklung, die neue, effektivere Strategien hervorbringen. Ein neuer Ansatz zur Verkürzung der „Fill-Zeit“ und zu Vergrößerung der Dimensionen des Bauteils ist bei der Firma EOS zu beobachten, die erstmals zwei Filllaser parallel betreibt. Allgemein beinhaltet die Scanstrategie neben der reinen Strahlführung auch Elemente wie Beschleunigung oder Verzögerung des Laserstrahls, um einen insgesamt möglichst homogenen Energieeintrag zu gewährleisten.

In den nächsten Abschnitten werden die grundlegenden Aspekte der Scanstrategie beim Laser Sintern vom Kunststoff, sowie bestimmte Optionen kurz näher betrachtet.

In den nachfolgenden Diagrammen wurden die einzelnen Bearbeitungsschritte der verschiedenen Belichtungsstrategien beim Laser Sintern graphisch dargestellt:

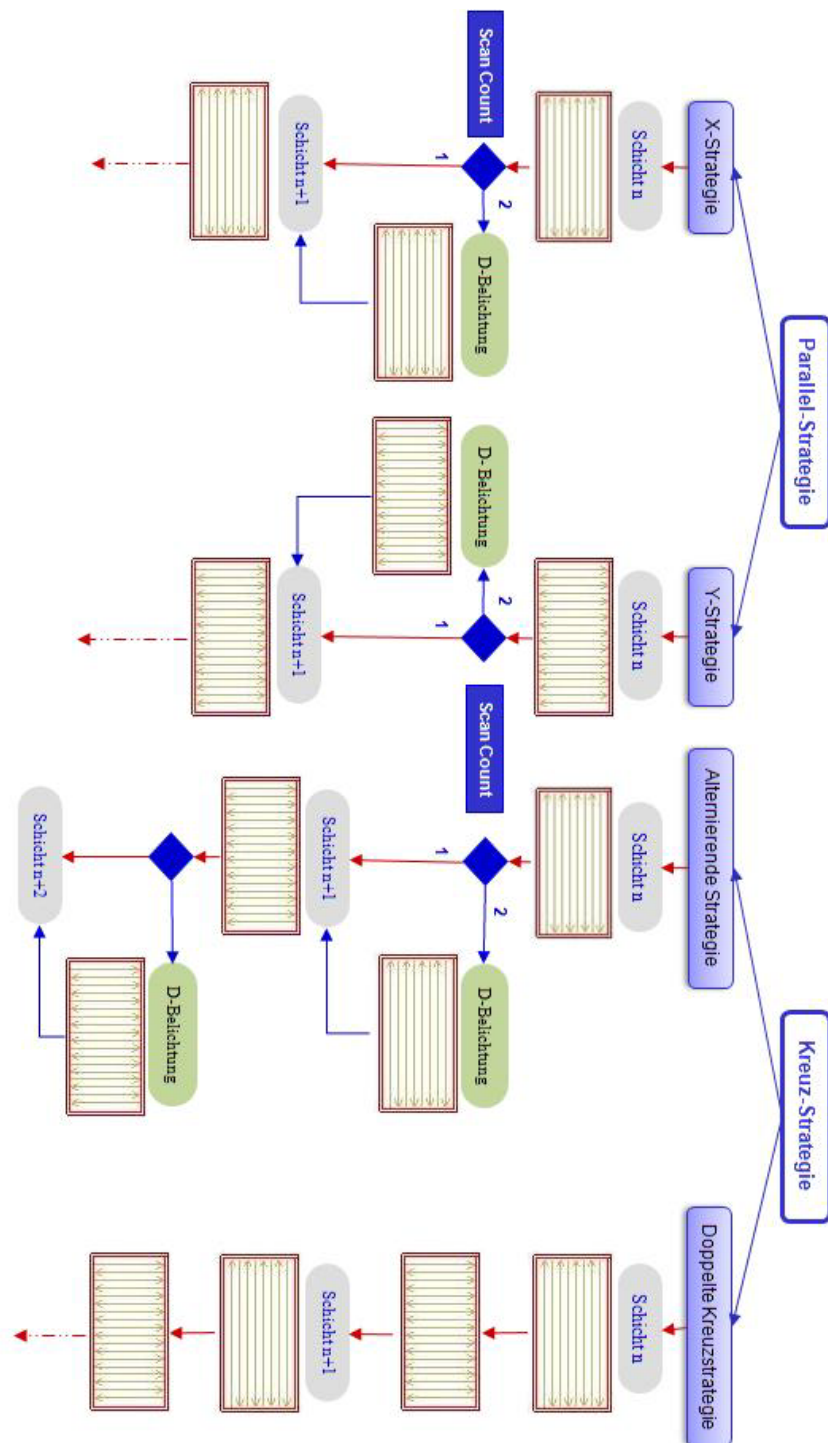


Abbildung 4-1: Die verschiedenen Scanstrategien beim Laser Sintern [43]

Im Unterschied zu den Scanstrategien beim Strahlschmelzen, gibt es beim Lasersintern von Kunststoffen keine Einschränkungen bezüglich der Länge der Scanlinien (der Scanvektorlänge), so dass die Unterteilung der Materialoberflächen in verkleinerte Querschnittflächen wie z. B. Quadrate nicht notwendig ist. Der Verlauf des

Filllaser innerhalb des Bauraums beim LS ist koordinatenbezogen, so dass die Unterscheidung der Scanstrategien immer koordinatenabhängig ist. Dabei wird zwischen zwei Grundvarianten der Scanstrategien unterschieden, Parallel-Strategie (Parallel Fill Scan) und Kreuz-Strategie (Cross Fill Scan) (vgl. Abbildung 4-1). In dieser Arbeit werden die Wirkungen der beiden Strategien auf die mechanischen und optischen Eigenschaften der Bauteile untersucht (siehe Kapitel 5.2).

4.1 Parallel-Strategie

Die wohl einfachste Belichtungsstrategie ist die Parallel-Strategie, die von herkömmlichen Computer-Druckern bekannt ist. Im Bereich des Laser-Sinterns wird der Laser zeilenweise entweder in X-Richtung über das Pulverbett gelenkt und anschließend um einen definierten, konstanten Linienabstand h_s in Y-Richtung verschoben, bevor die nächste Zeile belichtet wird, was man als „**X-Belichtung**“ bezeichnen kann, oder in die Y-Richtung mit Vorschub in die X-Richtung, was als „**Y-Belichtung**“ bezeichnet wird. Dadurch entstehen parallele angeordnete Sinterlinien, denen diese beiden Strategien ihren Namen verdanken. Diese parallelen Geraden oder Linien entstehen durch die Überschneidung einer parallelen Schraffurmaske mit den sämtlichen Außen- und Innenkonturen einer Schicht (vgl. Abbildung 4-3).

Der Scanner bewegt den Laserstrahl hierbei in parallelen Geraden über die Pulveroberfläche. Jede Gerade besitzt entlang ihres Verlaufs Kontrollpunkte (vgl. Abbildung 4-2), an denen die Schraffursegmente beginnen (Kontrollpunkt 1) bzw. enden (Kontrollpunkt 2). Dementsprechend wird der Laser dort beginnend an- oder ausgeschaltet. In zu belichtenden Bereichen ist er eingeschaltet, bei Unterbrechungen der Fläche entlang der Schraffurgeraden, Totstrecken genannt, wird der Laser ausgeschaltet [24].

Während der Sinterphase (Bauphase) wechselt der Vorschub von Schicht zu Schicht die Richtung, d.h. von der positiven in die negative Y-Richtung und umgekehrt bei der X-Belichtung und von +X zu -X und umgekehrt bei der Y-Belichtung [44]. Eine schematische Darstellung der resultierenden Sinterlinien ist in Abbildung 4-5 zu sehen.

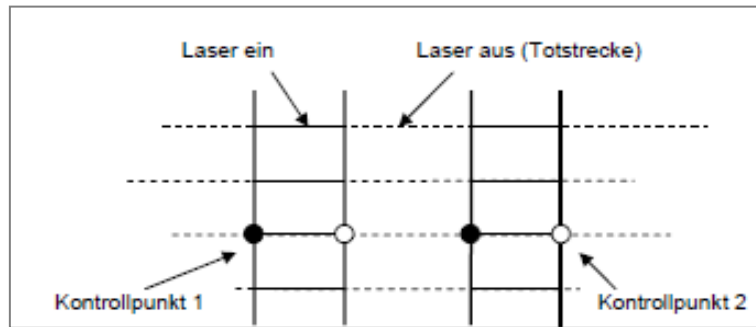


Abbildung 4-2: Parallele Schraffurgeraden mit Kontrollpunkten

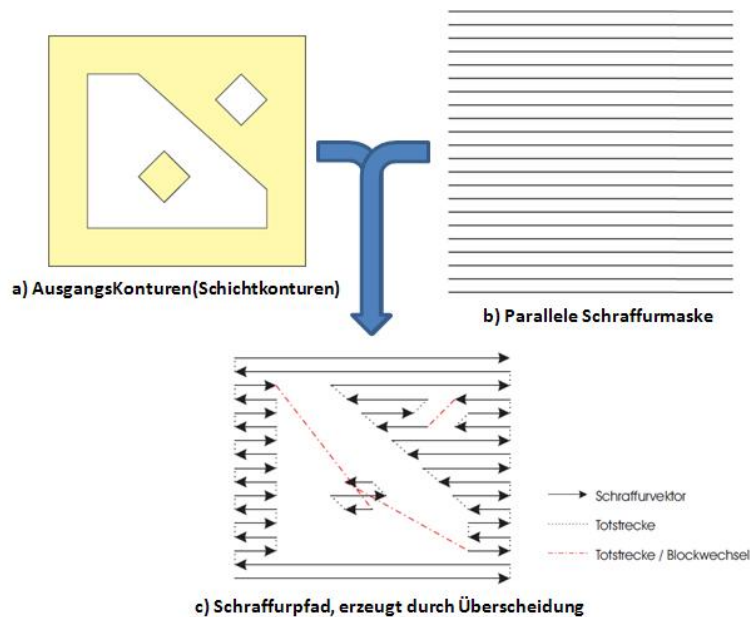


Abbildung 4-3: Generierung von Schraffurpfaden [24]

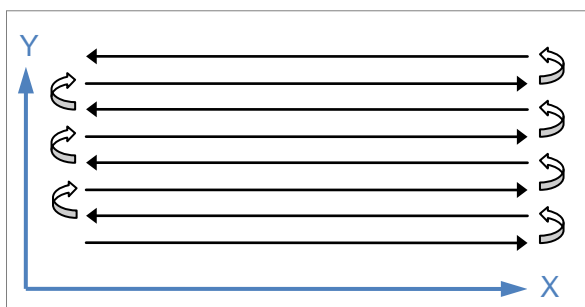


Abbildung 4-5: Parallel-Strategie

4.2 Kreuz-strategie

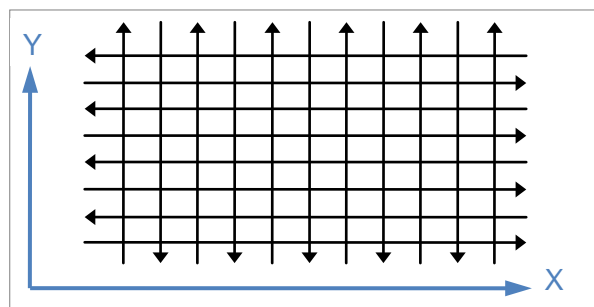


Abbildung 4-4: Kreuzstrategie

Eine weitere Belichtungsstrategie im Bereich des Laser-Sinterns erfolgt analog zur Parallel-Strategie, jedoch mit dem Unterschied, dass die Belichtungsrichtung des Filllasers in jeder Schicht um 90 Grad zueinander gedreht wird, sodass sich die Sinterlinien von Schicht zu Schicht im rechten Winkel überschneiden. Zu diesem Zweck werden in benachbarten Schichten zueinander rechtwinklige Schraffurmasken ver-

wendet um die Richtung der Scanlinien schichtweise zu alternieren und daher wird diese Strategie „**Alternierende Kreuzstrategie**“ genannt. Es gibt hier auch die Möglichkeit, dass jede Schicht zwei Mal nacheinander sowohl in X als auch in Y-Richtung belichtet wird, wodurch ein Kreuzmuster entsteht. Ein Kreuzendes Schraffurmuster kann durch die Verwendung zweier zueinander rechtwinkliger Schraffurmasken erzeugt werden [24] (vgl. Abbildung 4-4). Daher trägt diese Strategie den Namen „**Doppelte Kreuzstrategie**“ (vgl. Abbildung 4-1). Es ist zu erwarten, dass durch die Variation der Scanrichtung isotropere Eigenschaften erzielt werden können (vgl. Kapitel 5.2).

4.3 Fülltypen

Je nach eingesetzter Software ist es ebenso möglich, die Belichtung mit verschiedenen, so genannten, Fülltypen durchzuführen, wobei zwischen drei Typen unterschieden werden kann [18], die in Abbildung 4-6 als Schema abgebildet sind.

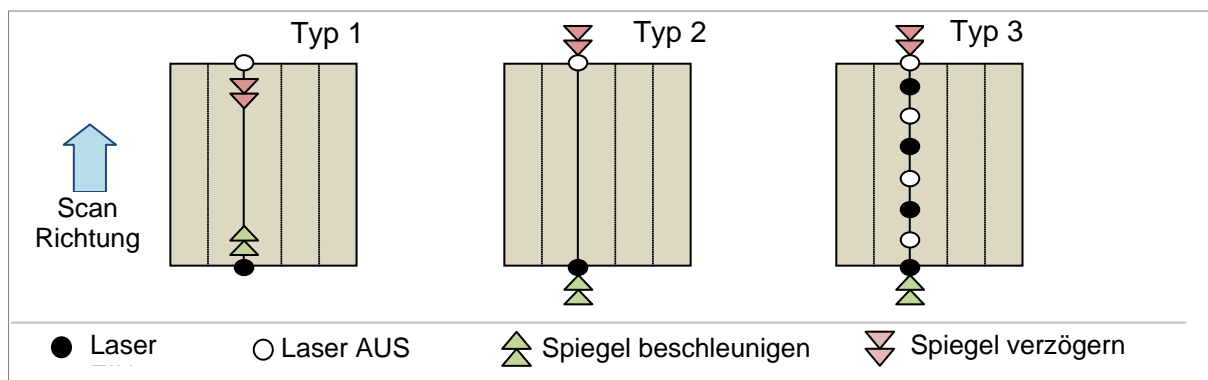


Abbildung 4-6: schematische Darstellung verschiedener Fülltypen

Bei Fülltyp 1, wie in Abbildung 4-6 zu sehen, wird das Scannersystem an den Rand der gewünschten Kontur gebracht, woraufhin der Laser aktiviert und erst dann, mit den Spiegeln, auf die vorher eingestellte Scangeschwindigkeit beschleunigt wird. Kurz vor Konturende wird der Strahl wieder abgebremst und schließlich auf der Konturlinie deaktiviert, bevor sich dieser Vorgang wiederholt. Alternativ dazu wird bei Fülltyp 2, der in Abbildung 4-6 dargestellt ist, das Scannersystem schon vor Konturbeginn auf Scangeschwindigkeit gebracht um den Laser dann bei Überschreiten der Konturlinie zu aktivieren. Analog dazu wird der Laser bei Konturende deaktiviert und das Spiegelsystem erst außerhalb der Kontur verzögert. Da so die Scangeschwindigkeit über die gesamte Sinterlinie konstant bleibt, wird eine homogenere Energiedichte erreicht, was einen verminderten Verzug zur Folge hat. Fülltyp 3 ist eine Variation von Fülltyp 2, bei dem das Scanner-System ebenfalls vor Konturbeginn beschleunigt und nach Konturende verzögert wird, jedoch wird während des Belichtens

der gesamten Sinterlinie, der Laser immer wieder kurzzeitig deaktiviert, so dass Lücken entstehen. Im nächsten Schritt wird die gleiche Linie wiederholt abgefahren, wobei jedoch nur die im vorherigen Schritt ausgelassenen Stücke belichtet werden. Den so verminderten Eigenspannungen im Modell steht ein vergrößerter Zeitaufwand als Nachteil gegenüber, da jede Sinterlinie zweifach abgefahren werden muss. Insgesamt handelt es sich bei allen Fülltypen um die Umsetzung empirischer Erfahrungen, um Verzugerscheinungen möglichst zu minimieren. Die eigentliche Ursache für den Verzug, kurzzeitig hohe Temperaturdifferenzen, können auf diese Weise verfahrensbedingt allerdings nicht verhindert werden [18].

4.4 Sorted Fill

Bis zu diesem Punkt wurde lediglich von der Herstellung von soliden Körpern ausgegangen, sollen Freiflächen in das Bauteil integriert werden, stellt sich die Frage, wie dies erstens überhaupt und zweitens möglichst effizient geschehen kann. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, während der Laser die Freifläche abfährt ihn einfach abzuschalten und erst am Ende der Freifläche wieder zu aktivieren, wie Abbildung 4-7 zeigt. Dieses Vorgehen erzeugt je nach gewünschter Kontur einen relativ großen Leerlauf des Lasers, in dem er bewegt wird, jedoch nicht aktiviert ist und somit die Effizienz herabsetzt.

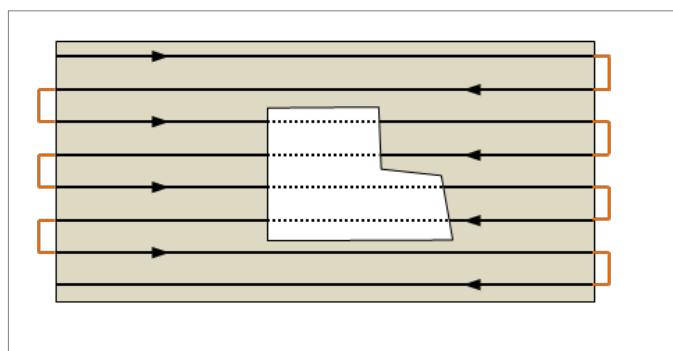


Abbildung 4-7: Vorgehensweise ohne Sorted Fill

Um eine homogenere Versinterung von Bauteilen mit größeren Leerflächen zu erreichen, kann die Option Sorted Fill aktiviert werden. Dadurch wird die normalerweise zeilenweise Abfahrt des Laserstrahls bei großen Lücken in mehrere Blöcke aufgeteilt, die einzeln abgearbeitet werden. Ist eine Leerfläche kleiner als der eingestellte Betrag des Sorted Fill Max Jump (SFMJ) dMJ, wird der Laser in diesem Bereich nur ausgeschaltet. Eine Fläche größer als der Wert von dMJ hingegen wird nicht überfahren, sondern komplett ausgelassen. Diese Wegoptimierung spart längere Totstre-

cken weitestgehend ein und der Laser arbeitet ohne große Unterbrechung, womit sich auch die Bauzeit reduziert [27].

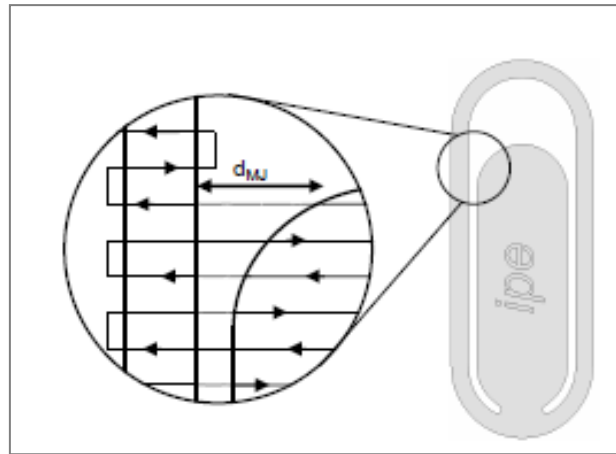


Abbildung 4-8: Option Sorted Fill reduziert große Totstrecken

Abbildung 4-8 verdeutlicht die Option Sorted Fill am Bauteil „Lesezeichen“. Der Laserstrahl fährt die Fläche zeilenweise ab. Zu Anfang ist er im Bereich der Freifläche noch ausgeschaltet. Ihre Ausdehnung in Scanrichtung liegt unterhalb des eingestellten Wertes von d_{MJ} . Mit größer werdender Freifläche im Bereich der Rundung übersteigt der Betrag des Leerlaufs allerdings diesen Wert. Hier stoppt der Laser nun und fährt den linken Bereich weiter ab, bis die Vorgabe nicht mehr erfüllt wird. Die ausgelassenen Bauteilbereiche werden im Anschluss bearbeitet. „Bei dünnwandigen Teilen mit großen Abmaßen und einem großen Verhältnis von Freifläche zu Sinterfläche führt der Einsatz zu verkürzten Fertigungszeiten, da der Leerlaufanteil nahezu verschwindet [27].

Allerdings kann es an der Ansatzlinie zwischen einer komplett zeilenweiser, und damit zeitlich länger zurückliegenden, und einer frischen Bearbeitung mit der Sorted Fill Option zu sichtbaren Übergängen kommen.

4.5 Rotate Scan Order

Ein weiterer Aspekt der Belichtungsstrategie fällt ins Gewicht, wenn mehr als ein Bauteil im Bauraum vorhanden ist. Prinzipiell verfährt das System immer in der gleichen Reihenfolge, belichtet also immer zuerst die Konturen von „Teil 1“ dann die von „Teil 2“, wobei die Nummerierung aufgrund des Imports ins „BuildSetup“ erfolgt. Das Resultat ist ein heterogener Temperaturverlauf, was sich negativ auf die Bauteilqualität auswirken kann. Das **Rotate Scan Order** (RSO) greift diese Problematik auf, in dem zwar die ursprüngliche Reihenfolge der Belichtung beibehalten wird, jedoch jede

Schicht mit einem anderen Querschnitt begonnen wird, was einen homogenen Temperaturverlauf erzeugt. Das Schema der eben beschriebenen Vorgehensweise ist in Abbildung 4-9 zu sehen

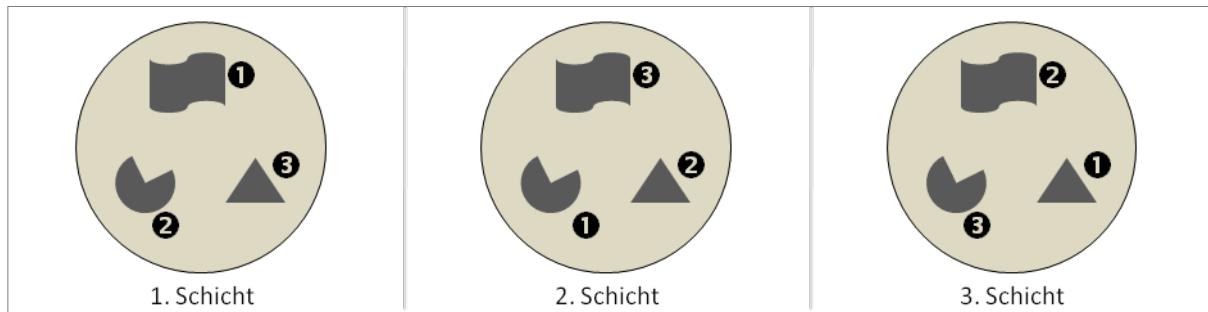


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Rotate Scan

5 Die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile

Im nun folgenden Kapitel, werden experimentellen Untersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften der Erzeugnisse erläutert und deren Ergebnisse ausgewertet. Hierzu werden verwendete Probekörper und deren Eigenschaften beschrieben.

5.1 Zugversuche nach DIN EN ISO 527-1

Zugversuche nach DIN EN ISO 527 Teil 1 ^[45] dienen im Kontext dieser Arbeit als Werkzeug zur qualitativen Bestimmung des Zugverformungsverhalten von Probekörpern, deren Geometrie und weitere Vorgaben ebenfalls in der Norm festgelegt sind, unter definierten Randbedingungen. Aus den so ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen lassen sich charakteristische mechanische Eigenschaften wie die maximale Zugfestigkeit R_m und das Elastizitätsmodul E ableiten.

Ganz allgemein betrachtet legt die Norm DIN EN ISO 527-1 Grundsätze zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen und Kunststoff-Verbünden fest, wobei die Eignung der beschriebenen Verfahren auf drei Werkstoffgruppen und deren Herstellungsverfahren beschränkt wird. Die generativen Verfahren werden in diesem Zusammenhang nicht aufgeführt, da allerdings keine derartige Norm vorliegt und eine Nähe zu steifen und halbsteifen thermoplastischen Spritzguss- und Extrusionsformmassen, die in der Norm Erwähnung finden, vorliegt, wurden die Zugversuche entsprechend DIN EN ISO 527-1 durchgeführt.

Die Versuche erfolgen mit Probekörpern Typ 1A gemäß DIN EN ISO 527-1, die bei entsprechender Dicke den Flachproben Typ 1A nach DIN 3167 entsprechen. Die Oberflächen der Probekörper sind vor dem Versuch zu kontrollieren und dürfen keine sichtbaren Mängel, Kratzer oder vergleichbare Fehler besitzen. Des Weiteren ist auf eine gleiche Belastungs- und Lagerungshistorie zu achten, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Die Geometrie ist in Kapitel 6 der Norm beschrieben und in Abbildung 5-1 illustriert.

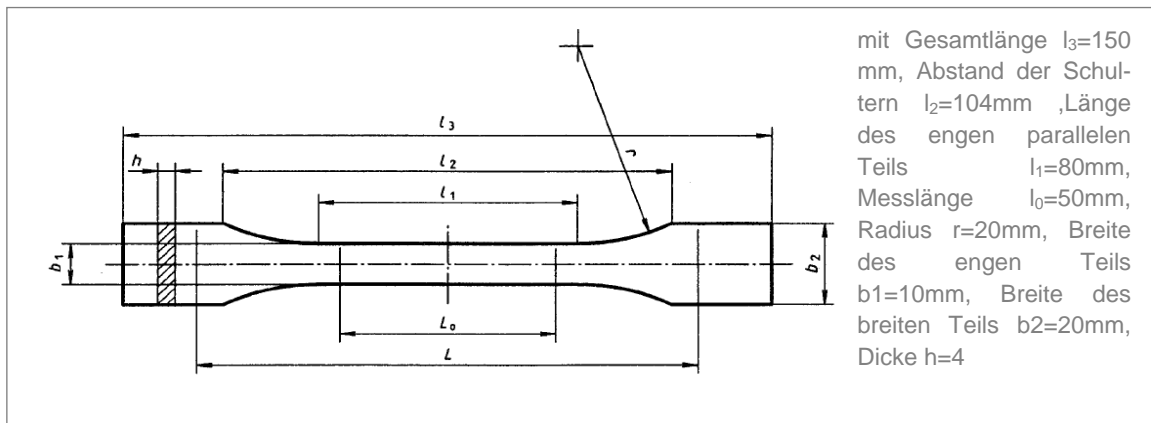


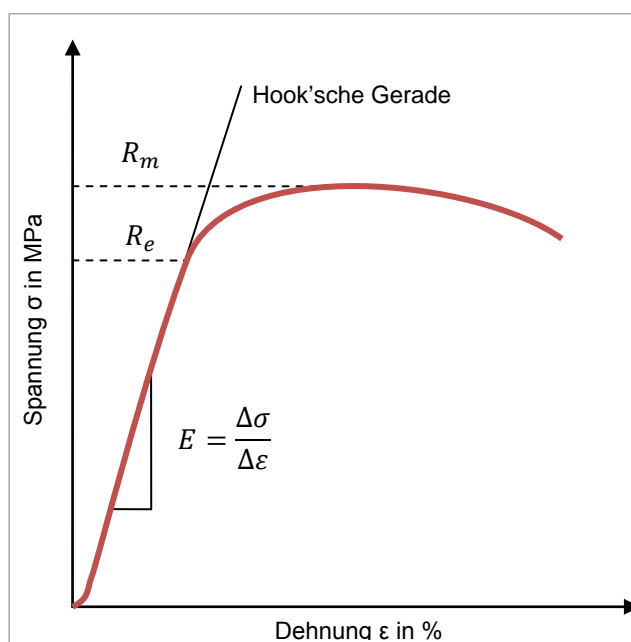
Abbildung 5-1: Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-1

Zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte wird der Probekörper entlang seiner größten Hauptachse mit konstanter Geschwindigkeit ($V_Z = 5$ mm/min) gedehnt, bis dieser bricht, oder vorgegebene Werte für Spannung oder Dehnung erreicht werden.

5.1.1 Charakteristische Größen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens im Zugversuch

Im folgenden Abschnitt werden die charakteristischen, mechanischen Größen, die im Weiteren zur Beurteilung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens herangezogen werden, kurz demonstriert.

Am anschaulichsten lässt sich das Spannungs-Dehnungsverhalten im so genannten Spannungs-Dehnungs-Diagramm darstellen. Dabei wird die momentan aufgebrachte Zugkraft auf den Querschnitt bezogen und als Zugspannung σ in [MPa] über der



momentanen Dehnung ε , also der Längenänderung in Bezug auf die Ausgangslänge der Probe, in [%] aufgetragen. Ein beispielhaftes Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die getesteten Probekörper ist in Abbildung 5-2 zu sehen, woraus sich relevante Größen zur Festigkeit und Elastizität des Werkstoffes direkt ablesen lassen.

Hinzuzufügen ist, dass die Zugspannungswerte eines Diagramms nur die

Abbildung 5-2: Beispiel eines Spannungs-Dehnungs-Diagramm

nominelle Spannung wiedergeben, da sie sich auf den Ausgangs-, nicht aber auf den momentanen Querschnitt beziehen. Veränderliche Querschnitte sind sehr schwer zu bestimmen und die Angabe der nominellen Spannung ist für technische Anwendungen im Allgemeinen ausreichend. Insgesamt liegen die Werte der wahren Spannung aufgrund der gleichen Kraft aber kleinerer Querschnittsfläche über denen der nominellen Spannung und erreichen ihr Maximum auch erst zum Zeitpunkt des Bruches.

Zur Beschreibung des Kurvenverlaufs, lässt sich das Diagramm grob in den Bereich der elastischen und der plastischen Verformung unterteilen. Nach vernachlässigbaren nicht-linearen Effekten beim Anlaufen der Zugmaschine, beginnt ein Bereich mit zumindest näherungsweise linearem Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Die daraus resultierende Gerade wird durch das Hook'sche Gesetz $\sigma = E \cdot \varepsilon$ beschrieben, das die Spannung σ über den Proportionalitätsfaktor E mit der Dehnung ε verbindet. Dieser Faktor entspricht der Steigung der Hook'schen Gerade und wird als Elastizitätsmodul bezeichnet. Dieser Wert ist eine charakteristische Größe, die den Widerstand eines Werkstoffes gegen dessen Verformung beschreibt und mit Megapascal die Einheit einer Spannung trägt.

Am Ende der Hook'schen Gerade endet der Bereich der elastischen Verformung an der so genannten Streckgrenze R_e , einer weiteren charakteristischen Größe. Ab diesem Punkt beginnt die plastische, also irreversible, Verformung des Probekörpers und die Differenz zwischen wahrer und nomineller Spannung vergrößert sich zunehmend. Im Weiteren steigt die nominelle Spannung bis zur ihrem maximalen Wert R_m an und beschreibt dort den Punkt, an dem bei duktilen Werkstoffen, die Einschnürung einsetzt. Durch die kleiner werdende Querschnittsfläche, sinkt die Zugkraft, die zur Einhaltung der definierten Prüfgeschwindigkeit notwendig ist. Da dieser Wert im Diagramm aber weiterhin auf die Ausgangsquerschnittsfläche bezogen wird, sinkt die nominelle Spannung von diesem Punkt an bis hin zum Bruch ab. Die Spannung zum Zeitpunkt des Bruches wird Reißfestigkeit, die Dehnung Reißdehnung genannt, beides sind ebenfalls charakteristische Größen zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens. Neben den beschriebenen Größen lässt sich das Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines Werkstoffes auch anhand der allgemeinen Form der Kurve charakterisieren. Beide Aspekte – also einzelne Größen und allgemeine Form – sollen bei der Auswertung der Zugversuche betrachtet und ausgewertet werden.

Polymere können nach der Form ihrer Spannungs-Dehnungs-Kurve in vier bis fünf Zähigkeits-Steifigkeits-Klassen eingeteilt [46] (vgl. Tabelle 5-1).

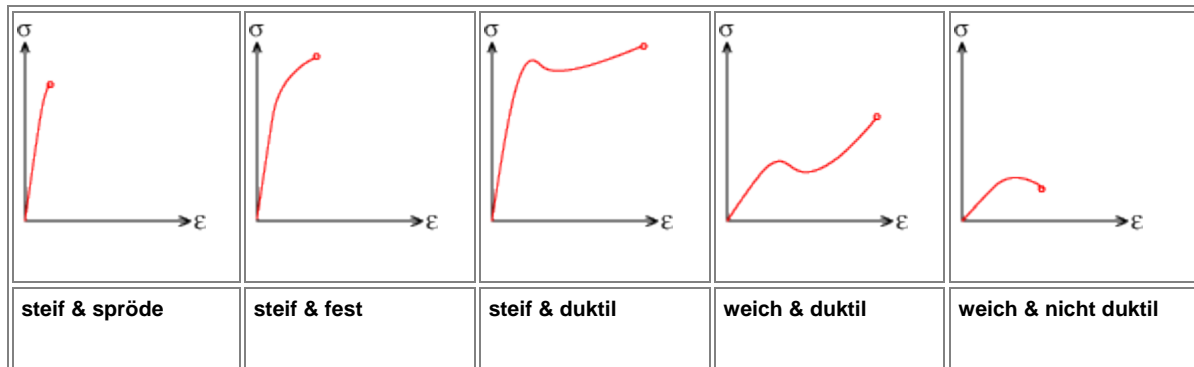


Tabelle 5-1: Typische Verläufe von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen [46]

5.2 Die Festigkeit in Abhängigkeit von der Belichtungsstrategie

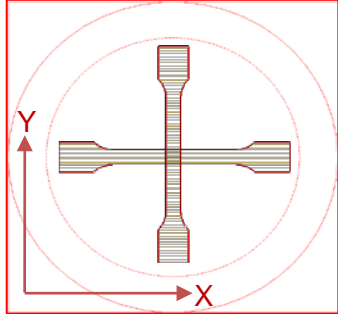
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Scanstrategie	Einflussgrößen: Die Belichtungsart	
Fill Scan Count=1, $P_f=7\text{ W}$, Outline Scan Count=1, $P_o=1.5\text{ W}$ $T=174^\circ\text{ C}$, $h_s=0.15\text{ mm}$, $V_s=1257\text{ mm/s}$. $D_s=0.1\text{ mm}$ Sinterstation DTM® 2000 - 855		
4 x 8 übereinander liegende X- & Y-Zugproben in der Bauraummitte aus derselben gebrauchten Pulvermischung.		

Abbildung 5-3: Die Orientierung einer X- & Y-Probe auf der Plattform

In dieser ersten Versuchsreihe sollte untersucht werden, inwieweit sich die Belichtungsstrategie auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten auswirkt. Zu diesem Zweck wurden in vier Bauprozessen jeweils acht Zugproben nach DIN EN ISO 527-1, in der Bauraummitte übereinanderliegend generiert.

In den ersten zwei Bauprozessen wurden nur X-Probekörper gebaut (also die Proben wurden entlang der Längsachse der Sinterstation® ausgerichtet). In dem ersten Bauprozess mit paralleler Scanstrategie und in dem zweiten mit alternierender Kreuzstrategie. Dazu wurden in den dritten und vierten Bauprozessen Y-Zugproben (an der Querachse ausgerichtet parallel zu der Pulverauftragswalze) gebaut und hier auch noch einmal mit paralleler Strategie in dem dritten Bauprozess und mit alternierender Kreuzstrategie in dem vierten. Beide Anordnungen im Bauraum sind aus Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 ersichtlich. Die jeweilige maximale Zugfestigkeit der 16 X-Proben sowie der 16 Y-Proben dieser Versuchsreihe wurden aus der Maximalkraft

und dem Anfangsquerschnitt der Probe berechnet und in den Abbildung 5-6 bis Abbildung 5-10 grafisch dargestellt.

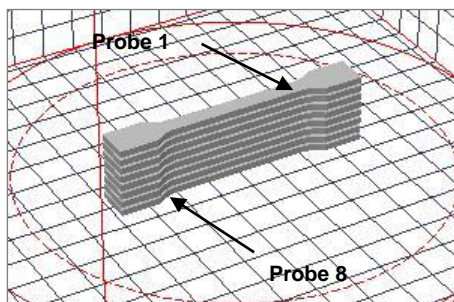


Abbildung 5-4: Anordnung der X-Proben im Bauraum

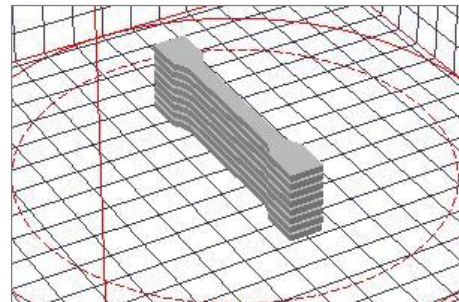


Abbildung 5-5: Anordnung der Y-Proben im Bauraum

Auswertung der Versuchsergebnisse:

Wie daraus leicht ersichtlich ist, liegen die gemessenen Zugfestigkeitswerte der mit Parallel-Strategie gebauten Y-Proben einer Bauhöhe, jeweils um bis 7 % über denen der mit der gleichen Strategie gebauten X-Proben (vgl. Abbildung 5-6). Ursache der differierenden Zugfestigkeit liegt in den unterschiedlichen Längen der Sinterlinien, die wiederum verschiedene Abkühlzeiten der Punkte einer Sinterlinie nach sich ziehen und somit maßgeblichen Einfluss auf den Grad der Versinterung besitzen.

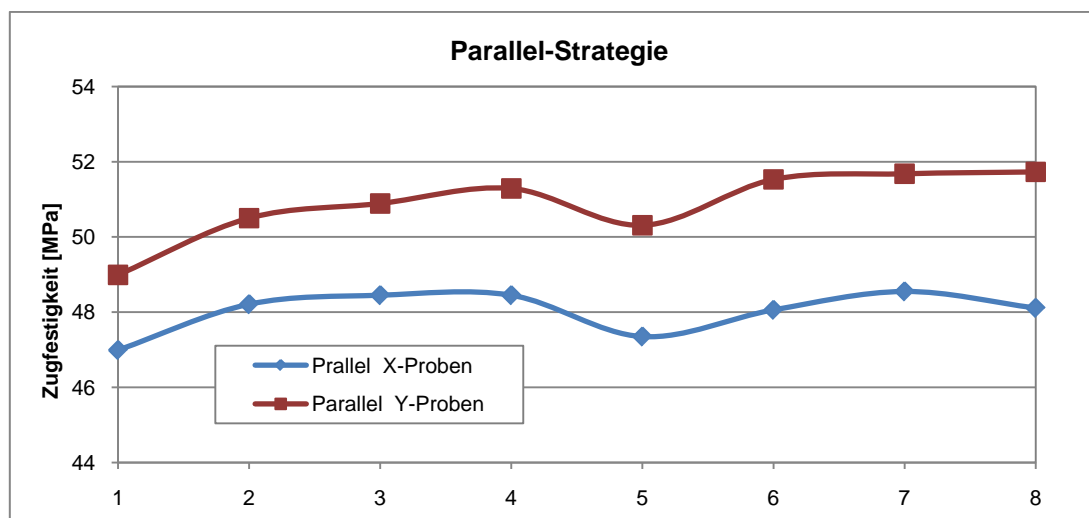


Abbildung 5-6: Verlauf der maximalen Zugfestigkeit von X- & Y-Proben mit paralleler Scanstrategie

Bei Betrachtung von Abbildung 5-7 erschließt sich, dass ein Punkt einer X-Probe aufgrund ihrer verlängerten Wartezeit mehr Zeit hat abzukühlen und so wird die Bindung zur nächsten Sinterlinie und somit die Festigkeit des gesamten Testkörpers schwächer. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass ein Punkt in der Mitte einer X-Probe eine fünfzehnfach längere Abkühldauer aufweist (0,1193 Sekunde entgegen 0,0079 Sekunde bei jeweils 1257 mm/s Scangeschwindigkeit) (vgl. Abbildung 5-11) (in Anlehnung an [27]).

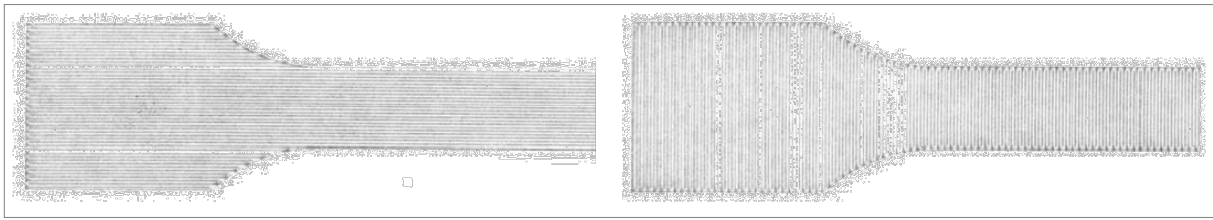


Abbildung 5-7: Verlauf der Sinterlinien von X-Proben (links) und Y-Proben (rechts) [27]

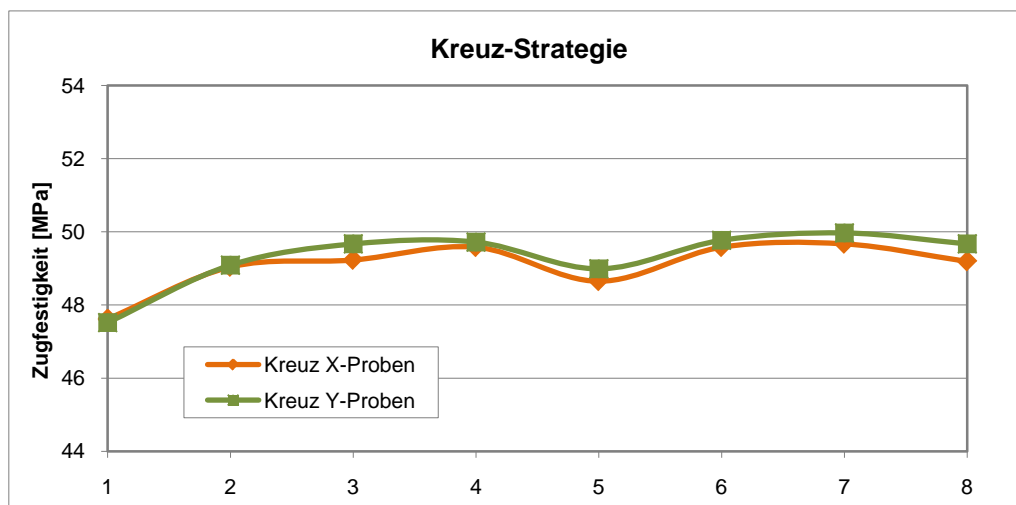


Abbildung 5-8: Verlauf der maximalen Zugfestigkeit von X- & Y-Proben mit Kreuz- Scanstrategie

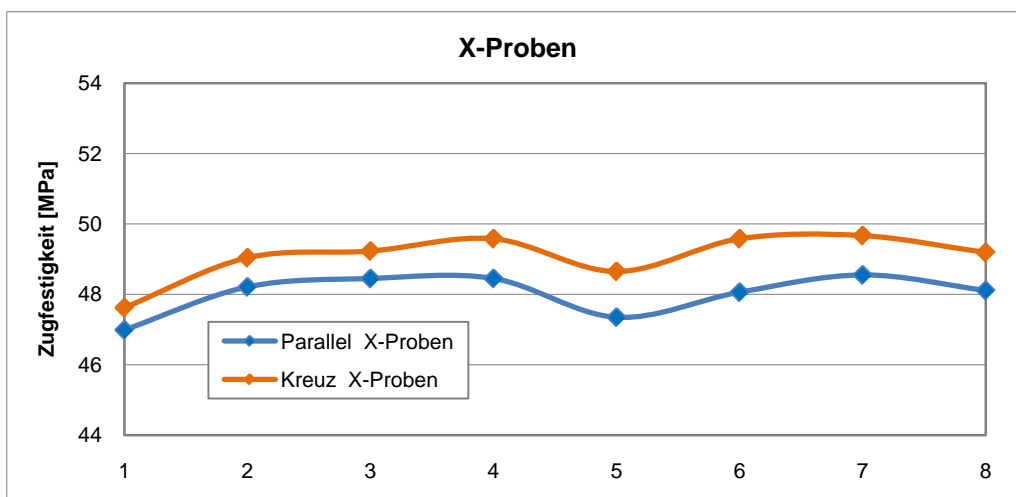


Abbildung 5-9: Vergleich der Zugfestigkeit der X-Proben, die mit Parallel- und Kreuzstrategie generiert sind

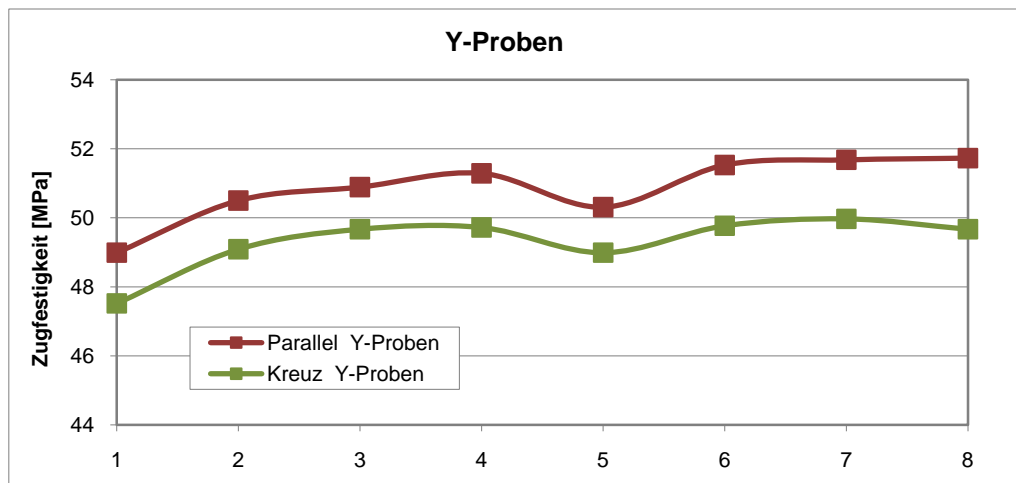


Abbildung 5-10: Vergleich der Zugfestigkeit der Y-Proben, die mit Parallel- und Kreuzstrategie generiert sind

Die Wartezeit t_x zum wiederholten Belichten eines Punktes in der Mitte einer X-Probe (in Anlehnung an [27]):

$$t_x = \frac{L_x}{V_s} = \frac{150}{1257.53} = 0.119s \quad \text{Formel 5-1}$$

L_x : Die Scanlänge in die X-Richtung.

V_s : Die Scangeschwindigkeit, die bei den Standardeinstellungen von der Sinterstation® DTM 2000 1257.53 mm/s beträgt.

Die Wartezeit t_y eines Punktes in der Mitte einer Y-Probe:

$$t_y = \frac{L_y}{V_s} = \frac{10}{1257.53} = 0.0079s \quad \text{Formel 5-2}$$

L_y : Die Scanlänge in die Y-Richtung.

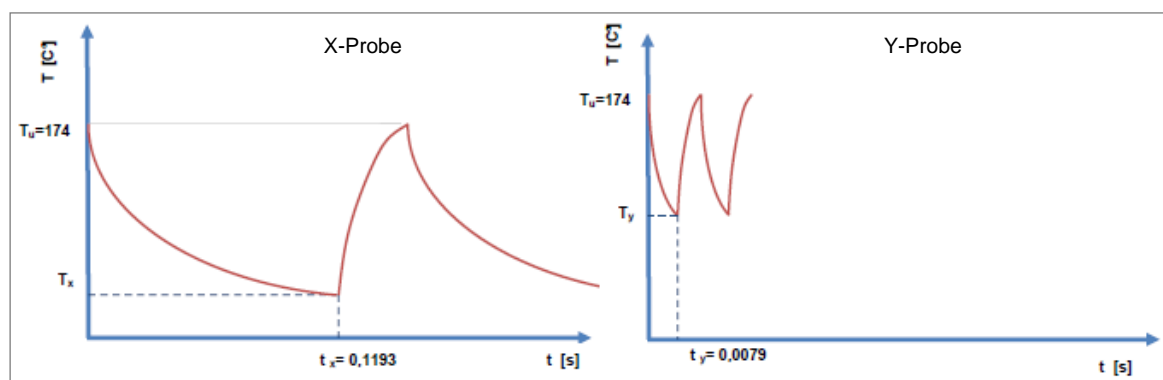


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung des Temperatur-Wartezeit Verlaufs bei X- & Y-Proben

Also mit den Parallel-Scanstrategien lässt sich keine homogene Gefügestruktur erzeugen und somit bleibt die Zugfestigkeit orientierungsabhängig.

Bei der Kreuzstrategie sind die Messwerte der X- und Y-Proben ungefähr gleich. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der X- und Y-Proben, die mit alternierender Kreuzstrategie generiert sind, laufen ganz nah und dicht aneinander (vgl. Abbildung 5-8). Die maximale Zugfestigkeit dieser Proben befindet sich immer in dem Bereich zwischen der Zugfestigkeit der Y- und X-Proben, die mit der Parallel-Strategie gebaut wurden (vgl. Abbildung 5-9 & Abbildung 5-10). Sie vererben sozusagen gleichzeitig sowohl die guten Abkühleigenschaften der Y-Proben als auch die schlechten Abkühleigenschaften der X-Proben. Die Abkühlzeit ändert sich dabei mit jedem Richtungswechsel des Laserverlaufs, also mit jeder neuen Schicht. Damit spielt die axiale Ausrichtung dieser Proben keine wesentliche Rolle, wie aus den Messergebnissen zu erkennen ist. Bleibt zu erwähnen, dass die Unregelmäßigkeit der Zugfestigkeitskurven auf die ungleichmäßige Wärmeverteilung entlang der Z-Achse in der Sinteranlage zurückzuführen ist.

5.3 Die Festigkeit in Abhängigkeit von Fill Laser Scan Count, Fill Laser Power und Outline Laser Scan Count

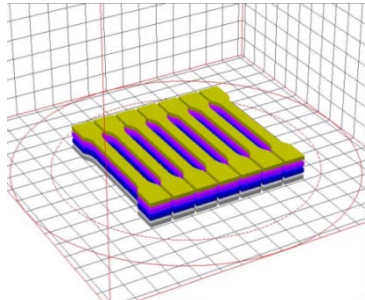
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Belichtungsanzahl & der Laserleistung	Einflussgrößen: Fill Scan Count (Anzahl der Belichtung pro Schicht), Füllaser Leistung P_f , Outlinelaser Scan Count	
<p>Fill Scan Count= 1 - 2, P_f= (50-100%)7 W, Parallel Strategie</p> <p>Outline Scan Count= 0 - 1, P_o=1.5 W</p> <p>$T=174^\circ\text{C}$, $h_s= 0.15\text{ mm}$, $V_s=1257.53\text{ mm/s}$.</p> <p>$D_s= 0.1\text{ mm}$, Anlage: DTM 2000 - 855</p>		
<p>4 x 7 nebeneinanderliegende Y-Zugproben in zwei Bauebenen (nach DIN EN ISO 527-1) aus derselben gebrauchten Pulvermischung.</p>		

Abbildung 5-12: Die Positionierung der Probekörper in den Bauraum

Abbildung 5-12: Die Positionierung der Probekörper in den Bauraum

Ziel und Aufbau des Versuchs:

Eine wesentliche Zielgröße beim LS von Kunststoff ist es, der Raumerfüllungsgrad oder die Materialdichte der generierten Teile zu erhöhen. Es wird versucht, dass die Dichte der mit dem Laser gesinterten Bauteile ihrer theoretischen Dichte anzunähern, um die besten Materialeigenschaften zu erreichen. Dafür gibt es zwei Maßnahmen, zum einen die pro einzelne Belichtung in das Material eingebrachte Energie zu erhöhen, was mittels der Umstellung von Prozessparametern machbar ist (vgl. Kapitel 5.11), zum anderen durch die doppelte Belichtung für jede Schicht (vgl. Abbildung 4-1).

Um Aussagen über die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Belichtungsanzahl zu treffen, wurden hier sieben nebeneinander gelegte Y-Zugproben gebaut. Die Laserleistung wird zwischen 3.5 und 7 W variiert. Die letzte Zugprobe in der Reihe von rechts wird nur einmal vom Füllaser belichtet mit einer Leistung von 7 W. Alle anderen Proben bekommen eine doppelte Belichtung. In der Reihenfolge von links nach rechts mit 50 % der Standardleistung (was einer Leistung von 3.5 W entspricht), 60 % (4.2 W), 70 % (4.9 W), 80 % (5.6 W), 90 % (6.3 W) und 100 % (7 W). Alle Proben wurden hier ohne Behandlung mit Outlinelaser gebaut.

Gleichzeitig sollte untersucht werden, welchen Einfluss der Outlinelaser auf die Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften der Probekörper hat. Zu diesem Zweck wurden zu den sieben Probekörpern, die ohne Belichtung vom Outlinelaser gebaut sind, weitere sieben mit Outlinelaser belichtete Probekörper hergestellt. Zwecks der statistischen Absicherung der Ergebnisse wurden dazu noch zwei Reihen mit den gleichen Einstellungen aber mit umgekehrter Anordnung der Proben gebaut.

Auswertung der Versuchsergebnisse:

Anhand der Ergebnisse der Zugversuche (siehe Abbildung 5-13 & Abbildung 5-15) ist festzustellen, dass durch die doppelte Einwirkung des Füllasers (mit einer Leistung von 60 % bis 100 % der eingestellten Standardleistung) die mechanischen Eigenschaften der Zugproben positiv beeinflusst wurden.

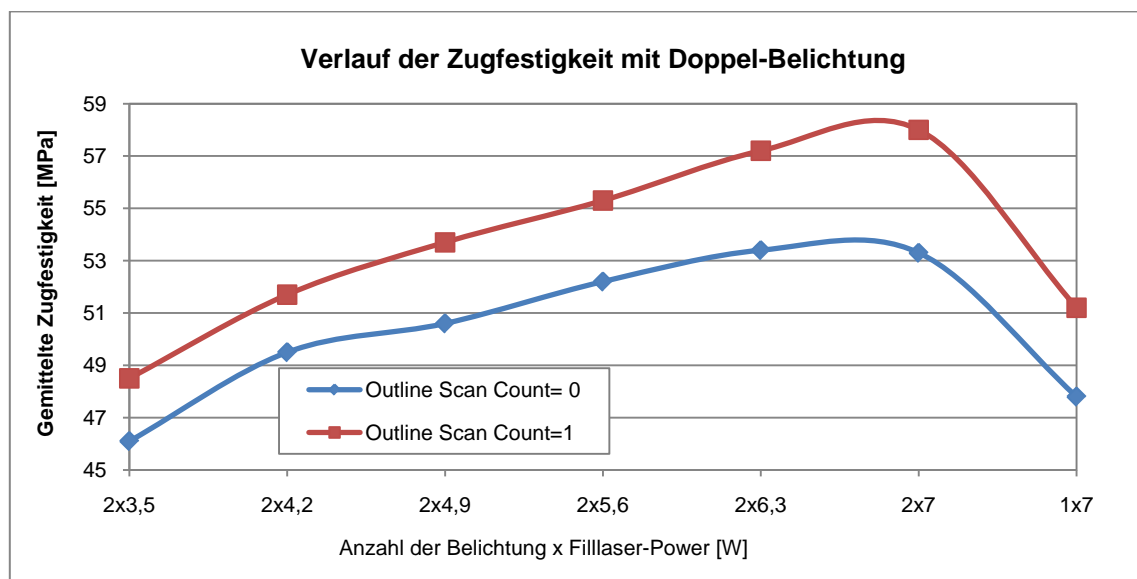


Abbildung 5-13: Verlauf der Zugfestigkeit mit einer Double-Belichtung vom Füllaser

Bei der Betrachtung von den Zugfestigkeitswerten der Proben, die mit der Standard-Filllaserleistung von 7 W gebaut wurden, ergibt sich ein Unterschied zwischen der einfachen Belichtung und der doppelten Belichtung von:

11.51 % bei Outlinelaser Scan Count= 0;

13.28 % bei Outlinelaser Scan Count= 1

Mittels der doppelten Bestrahlung vom Filllaser wird der Schmelze, die nach der ersten Belichtung entstanden ist, noch zusätzliche Energie zugeführt, was zu einer besseren Verschmelzung mit der tiefer liegenden Schicht führt. Dadurch wird die Materialdichte größer, als bei einer einzigen Bestrahlung, was die mechanischen Eigenschaften der Bauteile verbessert. Allerdings bei niedrigeren (etwa bei 50 %- 60 % der Standardleistung) Laserleistungen ist es offensichtlich, dass die Energiedichte für das Entweichen der Luft, die sich zwischen den Pulverpartikeln befand, zu schwach war. Auch eine mehrfache Belichtung kann diesen Effekt nicht kompensieren. Entscheidend für eine bessere Dichte ist, dass die Pulverpartikel bereits bei der ersten Belichtung vollständig aufschmelzen und zusammensinken. Daher muss die Luft entweichen, solange noch offene Porosität vorliegt. Bei mehrfacher Belichtung mit jeweils geringen Energiedichten bzw. geringen Laserleistungen wird beim ersten Kontakt mit dem Laserstrahl nur die Schichtoberfläche angeschmolzen und gewissermaßen versiegelt, sodass die Luft aus den Partikelzwischenräumen darunter eingeschlossen wird. Dadurch entstehen feine geschlossene Poren bzw. Bläschen, die aufgrund ihres geringen Volumens nicht mehr aus der Schmelze aufsteigen und entweichen können. Die schwache poröse Struktur bleibt bestehen (vgl. Abbildung 5-14).

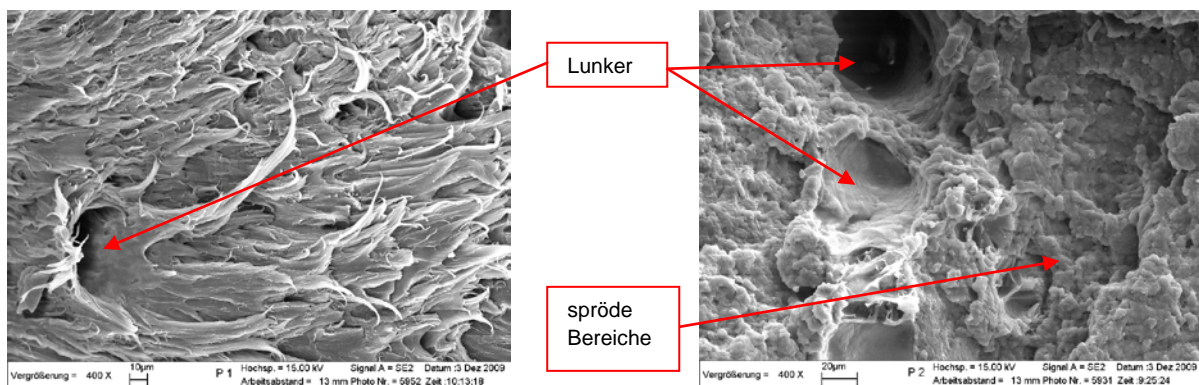


Abbildung 5-14: Im Bild links ist eine REM-Aufnahme von Bruchfläche einer Zugprobe, die mit doppelter Belichtung von $P_L = 7W$ bearbeitet wurde. Hier ist das Zusammenschmelzen der Pulverpartikel deutlich zu erkennen. Während bei der zweiten Probe, die zweimal mit $P_L = 4,2W$ belichtet wurde, (rechts) mehr Hohlräume (Lunker) und unversinterte Partikel zu sehen sind, da keine vollständige Versinterung stattgefunden hat.

Als Folge davon entsteht keine feste Verbindung zwischen den einzelnen Schichten. Die Messwerte der mechanischen Eigenschaften werden in diesem Fall niedriger ausfallen als bei einfacher Bestrahlung mit der Standardleistung. So z. B. beträgt die Zugfestigkeit der mit Outline und mit einer doppelten Belichtung von 50 %-Leistung bearbeiteten Proben 48,5 MPa und bei den Proben mit einfacher Belichtung von 100 %-Leistung 51.2 MPa. Die maximale Zugfestigkeit von 58MPa wurde also bei einmaliger Bestrahlung mit dem Outline-Laser und einer doppelten Bestrahlung mit der 100 %-Laserleistung (7 W) von dem Filllaser erreicht.

Alle gemessenen Parameter (Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, usw.) bei den Zugproben, die der doppelten Einwirkung des Filllasers ausgesetzt wurden, waren höher (eine Verbesserung der Eigenschaften von 13.28 % wurde erreicht) als bei denen, die mit einer einfachen Belichtung generiert sind. Der Einsatz von der doppelten Belichtung wird aber auch die Sinterzeit (die Zeit für die Belichtung des Schichtquerschnittes) für die betroffenen Teile verdoppeln. Das bedeutet auch höhere Baukosten. Bei der Aufwendung der doppelten Sinterzeit ist es also für den jeweiligen Zweck einzeln einzuschätzen, ob es aus wirtschaftlicher Hinsicht sinnvoll ist, eine doppelte Bestrahlung anzuwenden.

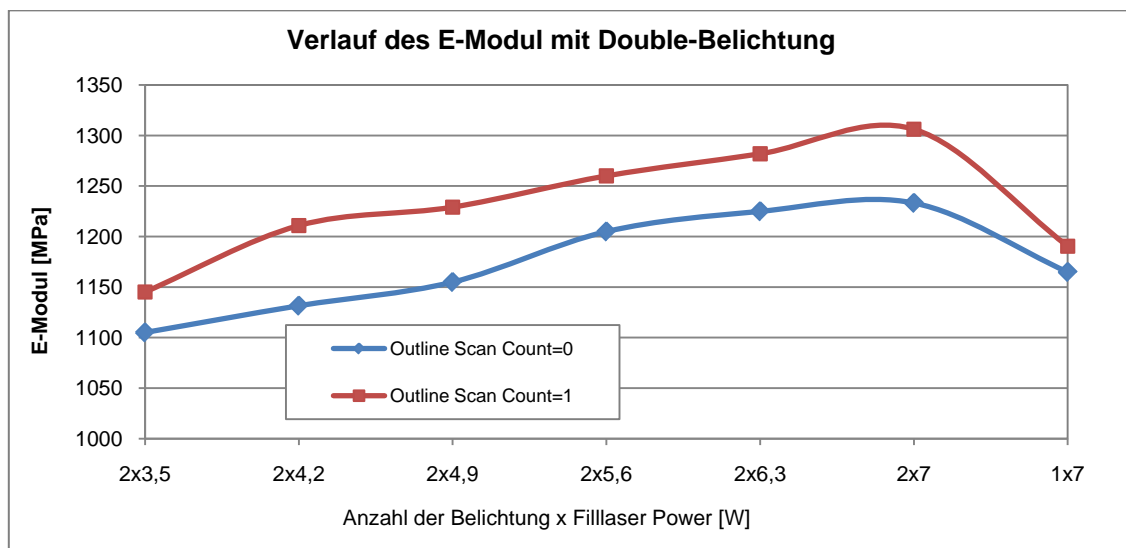
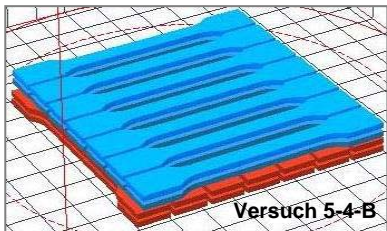
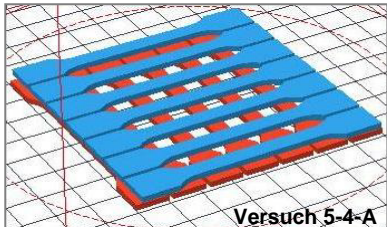


Abbildung 5-15: Verlauf des E-Moduls mit einer Double-Belichtung vom Filllaser

In Hinsicht auf die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Zugproben von der Belichtung mit dem Outline-Laser lässt sich mit Hilfe der Ergebnisdiagramme ganz deutlich erkennen, dass der Outline-Laser nicht nur als eine Option zur Verbesserung der Oberflächengüte der Bauteile dient, sondern auch ein Teil zur Verbesserung ihrer mechanischen Eigenschaften beiträgt. Der Outline-Laser umrandet die Sinterlinien in jeder Schicht und wirkt dabei als eine Art zusätzlicher Bindung, welche

die Eigenschaften der Erzeugnisse positiv beeinflusst. Es konnte eine Festigkeitssteigerung von bis 8.81 % durch den Einsatz vom Outlinelaser erreicht werden.

5.4 Die Festigkeit in Abhängigkeit vom Linienabstand

Zugfestigkeit in Abhängigkeit von dem Linienabstand	Einflussgrößen: Der Linienabstand h_s [mm]	
<p>Fill Scan Count= 1, P_f= 7 [W], Parallel Strategie</p> <p>Outline Scan Count= 1, P_o=1.5 [W]</p> <p>T=174[° C], V_s=1257.53 [mm/s], D_s= 0.1 [mm]</p> <p>Versuch 4-1: h_s= 0,08 – 0,35 [mm]</p> <p>Versuch 4-2: h_s= 0,08 – 0,21 [mm]</p> <p>Anlage: DTM 2000 - 855</p>		
<p>2 x 7 (V. 5-4-A)+ 4 x 7 (V. 5-4-B) nebeneinander liegende Y-Zugproben in zwei/vier Bauebenen (nach DIN EN ISO 527-1) aus derselben gebrauchten Pulvermischung.</p>		<p>Abbildung 5-16: Anordnung der Proben im Bauraum</p>

Ziel und Aufbau des Versuchs: (5-4-A)

Mit dem Linienabstand wird der Abstand zwischen den Achsen zweier benachbarten Scanlinien bezeichnet. Er beträgt erfahrungsgemäß nur etwa ein Drittel vom Fokussdurchmesser des Lasers (der Standardwert liegt bei 0,15 mm). Der Linienabstand bestimmt die Breite des Überlappungsbereiches bzw. die Verbindungskraft zweier benachbarter Sinterlinien (Vgl. Abbildung 5-17). Dadurch ist er maßgeblich für den Zusammenhalt innerhalb einer Schicht und somit für die Festigkeit des gesamten Bauteils verantwortlich.

Durch die Variation der Entfernung zwischen den Scanlinien soll ermittelt werden, welchen Einfluss der Schraffurabstand auf die mechanischen Eigenschaften der Testkörper unter gleichzeitiger Berücksichtigung derer Orientierung im Bauraum hat.

Es werden zuerst 14 Zugproben in zwei Reihen übereinander gebaut. Sieben Y-Zugproben in der unteren Reihe und sieben X-Proben in der oberen Reihe (vgl. Abbildung 5-16).

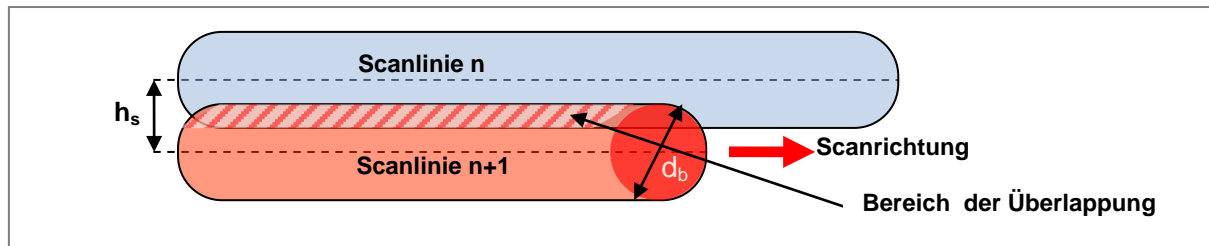


Abbildung 5-17: Die Überlappung benachbarter Scanlinien

Auswertung der Versuchsergebnisse: (Versuch 5-4-A)

Betrachtet man das Zugfestigkeits- und das E-Modul-Diagramm (vgl. Abbildung 5-18 & Abbildung 5-19), so ist die Tendenz zu erkennen, dass, mit Ausnahme der ersten Y-Probe, mit steigenden Linienabständen die Messergebnisse schwächer werden. Am Anfang nimmt die Zugfestigkeit in dem Bereich $h_s = 0,12 \text{ mm} - 0,25 \text{ mm}$ ungefähr linear langsam ab (Die Abnahme der Zugfestigkeit beträgt in diesem Bereich 11,35 - 12,56 %) und dann fällt sie mit der weiteren Vergrößerung des Linienabstands stärker ab. Zusätzlich ist festzustellen, dass die Y-Proben auf den Zugfestigkeits- und E-Modul-Diagrammen im Bereich zwischen 0,12 mm und 0,35 mm bessere Messwerte als die X-Proben aufweisen (siehe Kapitel 5.2).

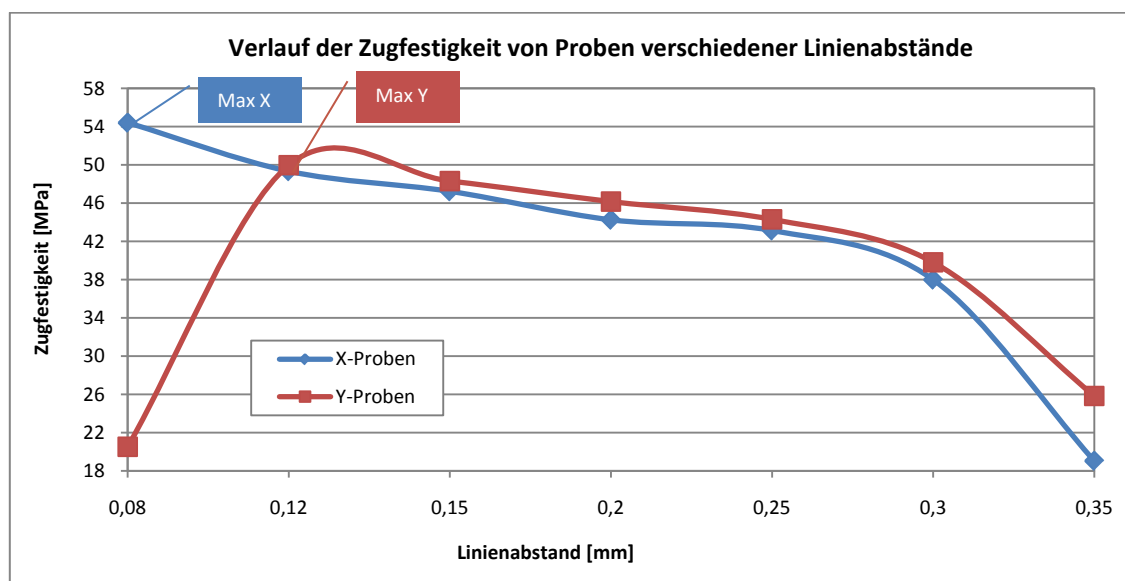


Abbildung 5-18: Zugfestigkeitsverlauf von Proben verschiedener Linienabstände

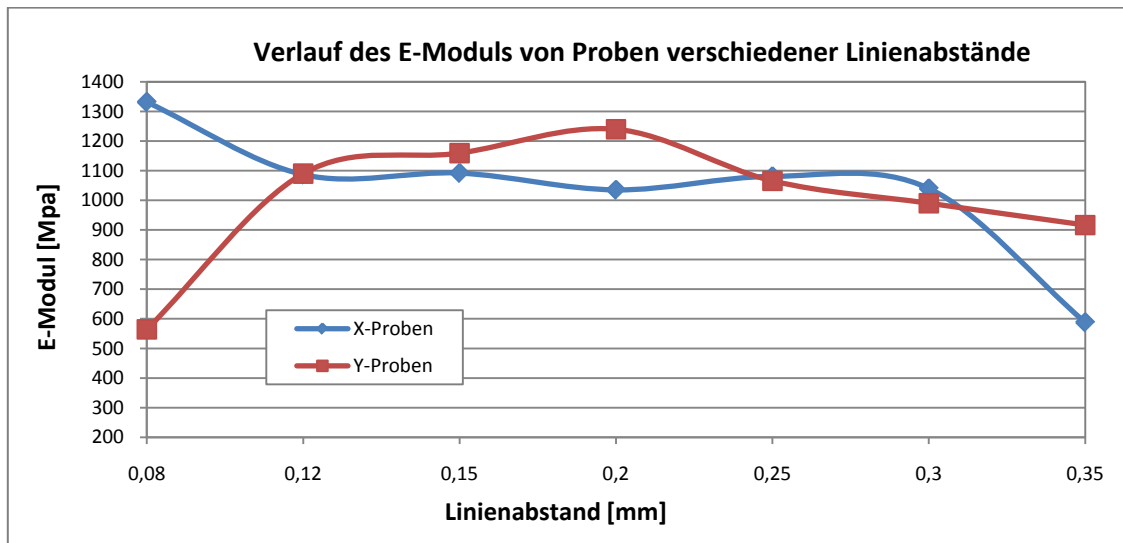


Abbildung 5-19: E-Modul-Verlauf von Proben verschiedener Linienabstände

Auf dem Bruchdehnungsdiagramm ist auch ein Bereich mit einem kleineren Abfall der Kurve bis zum 0,2 mm-Linienabstand deutlich zu erkennen (vgl. Anhang 9).

Anhand der aus den Zugfestigkeit- und E-Moduldiagrammen gewonnenen Informationen lässt sich ganz deutlich erkennen, dass die mechanischen Eigenschaften der Testkörper mit der Erhöhung der Linienabstände nachlassen, solange die anderen Prozessparameter konstant bleiben. Denn die Grundanforderung für den Zusammenhalt innerhalb einer Schicht ist die Überlappung der Belichtungsspuren der benachbarten Scanlinien (vgl. Abbildung 5-17). Wenn bei den größeren Linienabständen ein sehr enger Überlappungsbereich entsteht, wird die Verbindung zwischen den Sinterlinien und somit die Festigkeit des gesamten Bauteils schwächer. Wird der Abstand zwischen den benachbarten Linien h_s größer als der Durchmesser des Laserstrahls d_L , entsteht gar keine Verbindung zwischen den Sinterlinien, die entstandene Schicht bricht auseinander.

Ziel und Aufbau des Versuchs: (Versuch 5-4-B)

Bemerkenswert war das schlechte Abschneiden der Y-Proben mit dem Linienabstand 0,08 mm. Um diesen Bereich ($h_s = 0,08 - 0,12$ mm) genauer zu untersuchen und um sicher zu stellen, dass die Zugfestigkeitsabnahme in diesem Bereich kein Zufall war, bzw. dass diese Probe keinen Ausreißer darstellt, werden in dem zweiten Teil dieses Versuchs 28 Zugproben in vier Ebenen generiert. In den zwei unteren Ebenen werden Y-Proben mit den Linienabständen von 0,08 mm bis 0,14 mm in der ersten Reihe und von 0,15 mm bis 0,21 mm in der zweiten Reihe gebaut. In den zwei oberen Reihen lagen X-Proben mit der gleichen Anordnung (vgl. Abbildung 5-16).

Auf den dargestellten Diagrammen des Zugfestigkeits- und des E-Modulverlaufs (vgl. Abbildung 5-20 & Abbildung 5-21) ist festzustellen, dass bei den kleineren Linienabständen (bis $h_s = 0.1$ mm) die X-Proben im Vergleich zu Y-Proben bessere Messwerte haben und bei den größeren Linienabständen waren umgekehrt die Y-Proben besser, was sie ihrer Orientierung zu verdanken haben.

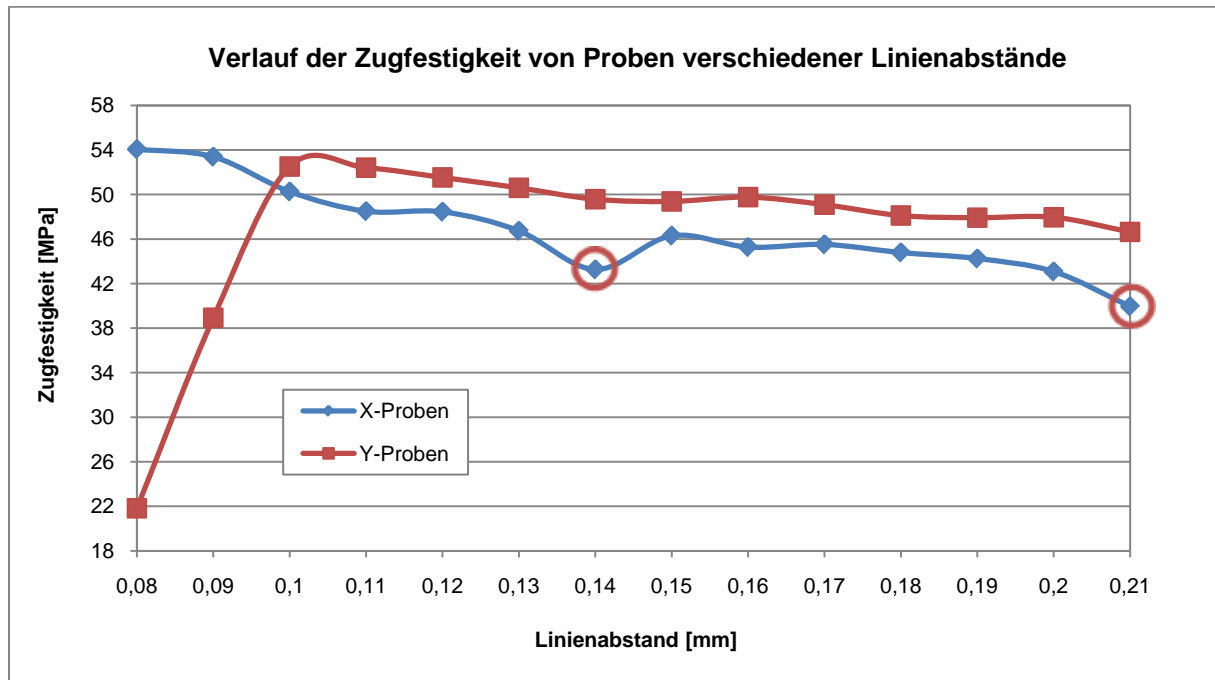


Abbildung 5-20: Zugfestigkeitsverlauf von Proben verschiedener Linienabstände

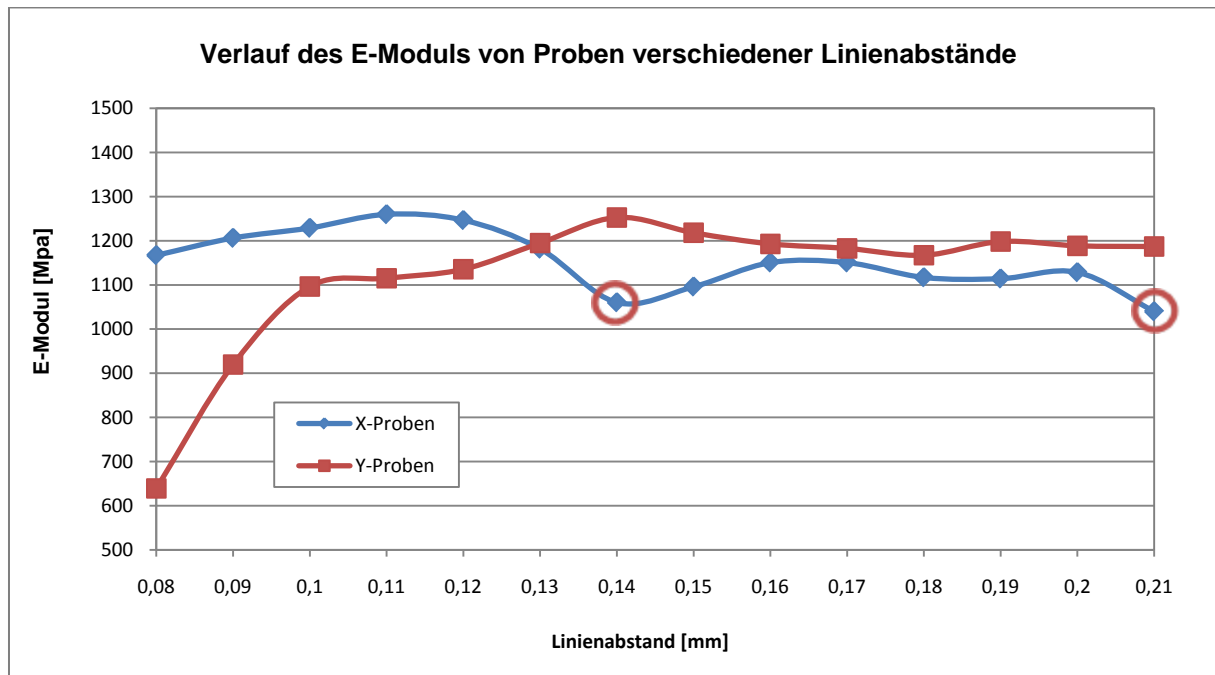


Abbildung 5-21: E-Modul-Verlauf von Proben verschiedener Linienabstände

Beim Scannen von Y-Proben mit einem kleineren Linienabstand (z. B. $h_s = 0.08 \text{ mm}$), wo die Länge der Sinterlinien L_x kürzer ist, wird die Abkühlzeit für einen beliebigen Punkt auf dem Schichtquerschnitt auch kürzer. Also trifft der Laser in kürzern Zeitabständen mehrere Male auf benachbarte Stellen. Das hat zur Folge, dass die Temperatur an dieser Stelle höher wird. Der benötigte Anteil an Energie zum Zusammenschmelzen der benachbarten Sinterlinien sollte auch dementsprechend kleiner sein. Aber bei unangepasster Energiedichte (Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Schichtdicke sind alle konstant) kommt es zu einer Wärmezunahme an dieser Stelle. Diese Wärme hat weniger Zeit, um sich zu verteilen als bei einem größeren Linienabstand oder als bei den X-Proben, wo die Wartezeit größer ist. Als Folge dafür kommt es zu einer Materialersetzung an der Schichtoberfläche.

Bei einer Zugprobe mit einem Linienabstand von $0,08 \text{ mm}$ wird jeder einzelne Punkt 5-mal nacheinander mit dem Laser bestrahlt (vgl. Abbildung 5-22).

Die Anzahl der Belichtungen eines Punktes: $N = \frac{\text{Laserdurchmesser}}{\text{Linienabstand}} = \frac{0,4\text{mm}}{0,08\text{mm}} = 5$

Die Länge der Zugprobe beträgt 150 mm , die Breite ist 10 mm . Die Abkühlzeit eines Punktes der Y-Probe, der in der Mitte der Probe liegt, ist also 15-mal kürzer, als die

bei einer X-Probe und beträgt $t = \frac{10\text{mm}}{1257,3\text{mm/s}} = 7,954 \times 10^{-3} \text{ s}$

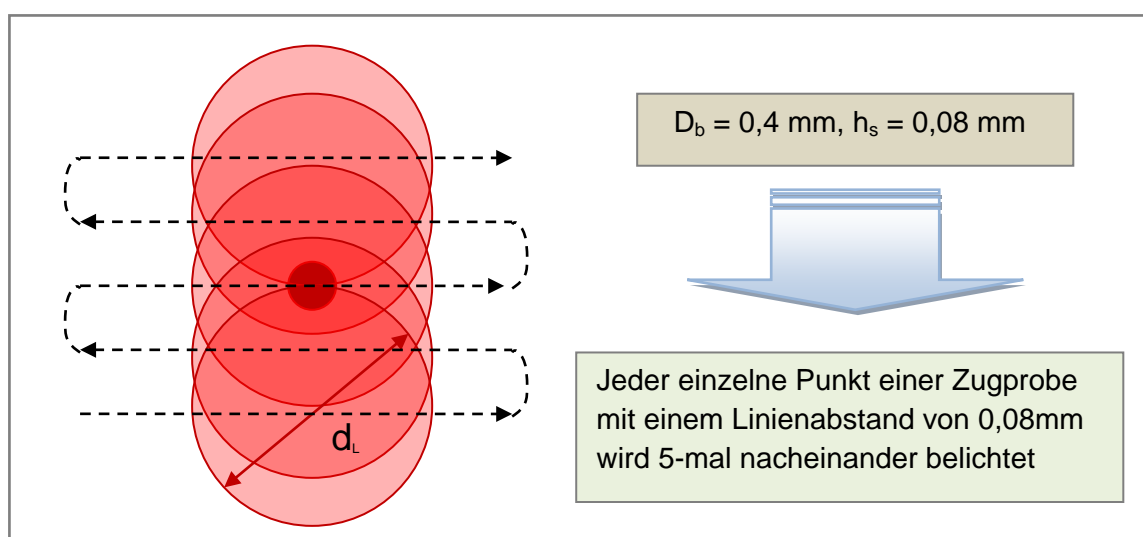
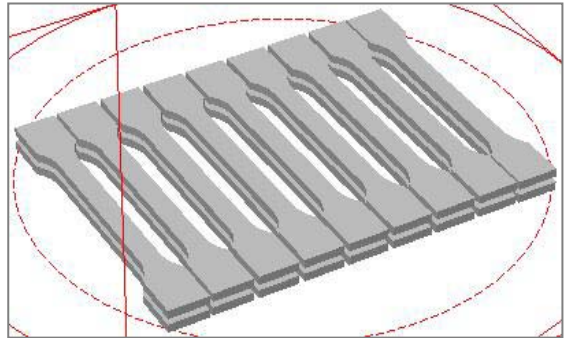


Abbildung 5-22: Anzahl der Belichtungen eines Punktes bei $0,08\text{mm}$ Linienabstand

Durch den Mangel an der Abkühlzeit zersetzt sich das Material, was zwangsläufig zur Verschlechterung seiner mechanischen Eigenschaften führt und die niedrigeren Messwerte der Y-Proben mit $h_s = 0,08 - 0,09$ mm erklärt. Die maximale Zugfestigkeit wurde bei X-Proben mit dem Linienabstand 0,08 mm und bei Y-Proben bei $h_s = 0,1$ mm erreicht.

Bei der Betrachtung der Diagramme (vgl. Abbildung 5-20 & Abbildung 5-21) ist anzumerken, dass die X-Proben mit 0,14 mm und 0,21 mm Linienabstand sowohl auf dem Zugfestigkeitsdiagramm, als auch auf dem E-Modul-Diagramm die Tiefpunkte der beiden Verläufe darstellen. Das sind die Proben die sich am vorderen Rande der Bauplattform der Sinterstation[®] befanden (vgl. Abbildung 5-16). Der Grund, dass sie etwas schlechtere Messwerte aufweisen, liegt daran, dass die Oberflächentemperatur und somit der Lasereindringtiefe an dieser Stelle von der Plattform wegen des Wärmeverlusts durch das Bauraumfenster kleiner ist (vgl. Abbildung 3-8).

5.5 Die Festigkeit in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	Einflussgrößen: Die Geschwindigkeit V_s [mm.s ⁻¹]
Fill Scan Count= 1, $P_f = 6$ [W], Parallel Strategie Outline Scan Count= 1, $P_o = 1.5$ [W] $T = 174$ [°C], $V_s = 1257.53$ [mm/s], $D_s = 0.1$ [mm] $h_s = 0,15$ [mm] Anlage: DTM 2000 - 705	
2 x 9 nebeneinander liegende Y-Zugproben in zwei Bauebenen aus derselben Pulvermischung (Altes Pulver+ 20% neues Pulver).	Abbildung 5-23: Anordnung der Zugproben im Bauraum

Ziel und Aufbau des Versuchs:

Die Scangeschwindigkeit des Fülllasers hat eine große Auswirkung nicht nur auf die mechanischen Eigenschaften der generierten Teile sondern auch auf ihre Baukosten. Um die Baukosten zu reduzieren wurde stets versucht die Bauzeit möglichst zu verkürzen, in dem die Scangeschwindigkeit auf den maximalen Wert gesetzt wird. Die Bauzeit kann aber durch den Einsatz immer größerer Lasergeschwindigkeiten nicht beliebig verkleinert werden, da der Sinterprozess in dem Pulver eine gewisse Zeit benötigt, um vollständig abzulaufen. Um die Wirkung der Lasergeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit und das E-Modul der Erzeugnisse zu untersuchen, werden in zwei Reihen 18 Y-Zugproben mit unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten (400,

650, 900, 1160, 1400, 1650, 1900, 2150, 2400 mm/s) mit konstanter Laserleistung gebaut (vgl. Abbildung 5-23).

Auswertung der Versuchsergebnisse:

Auf dem Zugfestigkeitsdiagramm ist ein kontinuierlicher Abfall der Zugfestigkeit mit steigender Geschwindigkeit unter unangepasster Energiedichte deutlich zu erkennen.

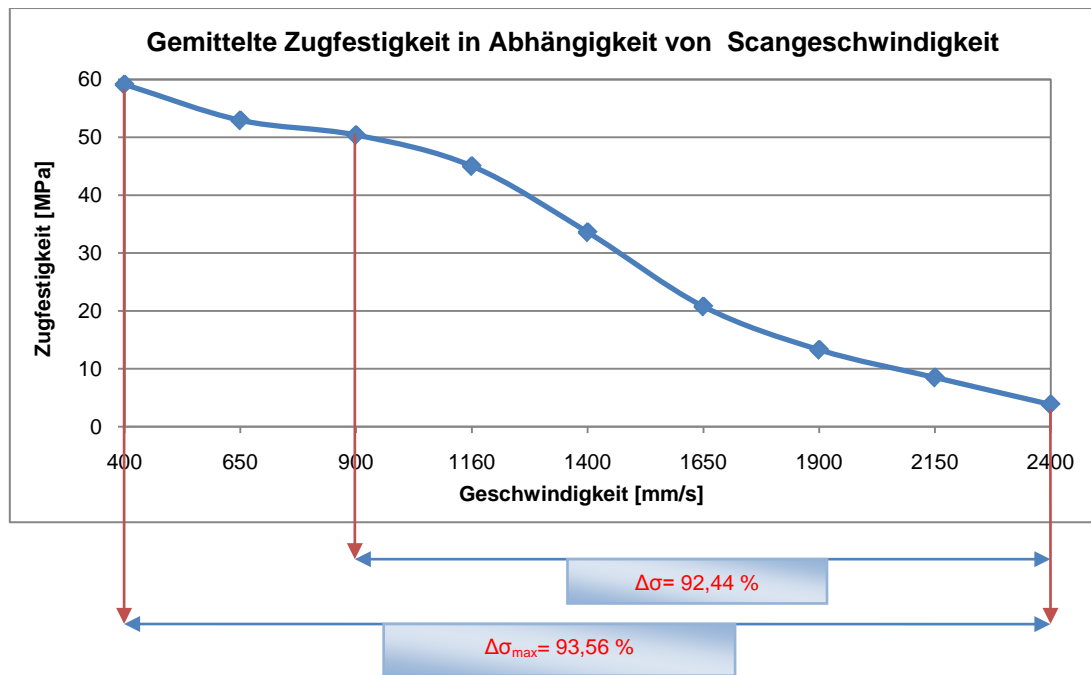


Abbildung 5-24: Zugfestigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

Der Laser-Sinterprozess ist bei den generativen Fertigungsverfahren hauptsächlich durch drei Faktoren geprägt. Das sind die Laserleistung, die Bauraumtemperatur oder die Vorheiztemperatur und die Einwirkungszeit des Lasers. Die benötigte Einwirkungszeit für den Laser wird hier durch die Scangeschwindigkeit des Filllasers bestimmt, die ihrerseits im umgekehrten Verhältnis zu der Energiedichte oder zu der sogenannten Streckenenergie E_s steht (vgl. Formel 5-5)

Bei konstanter Laserleistung führt die Erhöhung der Geschwindigkeit zur Verkürzung der Einwirkungszeit des Lasers und somit zu einer verminderten Streckenenergie. Die Streckenenergie beeinflusst hauptsächlich die Materialdichte und die Zugfestigkeit des Bauteils. Je kleiner die Streckenenergie ist, desto kleiner ist die Materialdichte und somit die Zugfestigkeit. Dies ist auf die niedrige Sinterrate zurückzuführen, die direkt proportional zu der Energieeinbringung ist.

Das Gleiche gilt auch für den E-Modul, wie auf der Abbildung 5-25 zu sehen ist. Der E-Modul der ersten fünf Zugproben ist deutlich größer, als bei den anderen vier. Abbildung 5-26 zeigt ein Vergleich zwischen zwei Proben, die mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten gebaut sind. Bei der Probe, die mit der größeren Geschwindigkeit ($v_s=2400$ mm/s) gebaut wurde, war das Material weich und spröde, es entstand auch keine Einschnürung. Diese Tatsache, dass der E-Modul durch die Erhöhung der Geschwindigkeit beeinträchtigt wurde, ist auch auf die nicht ausreichende Leistung bei großer Geschwindigkeit zurückzuführen.

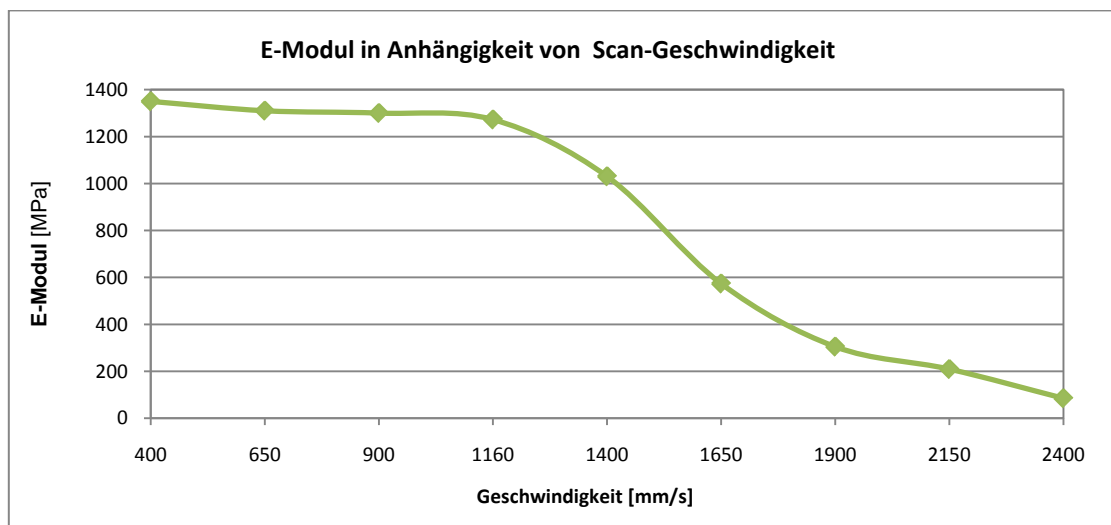


Abbildung 5-25: E-Modul-Verlauf in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit

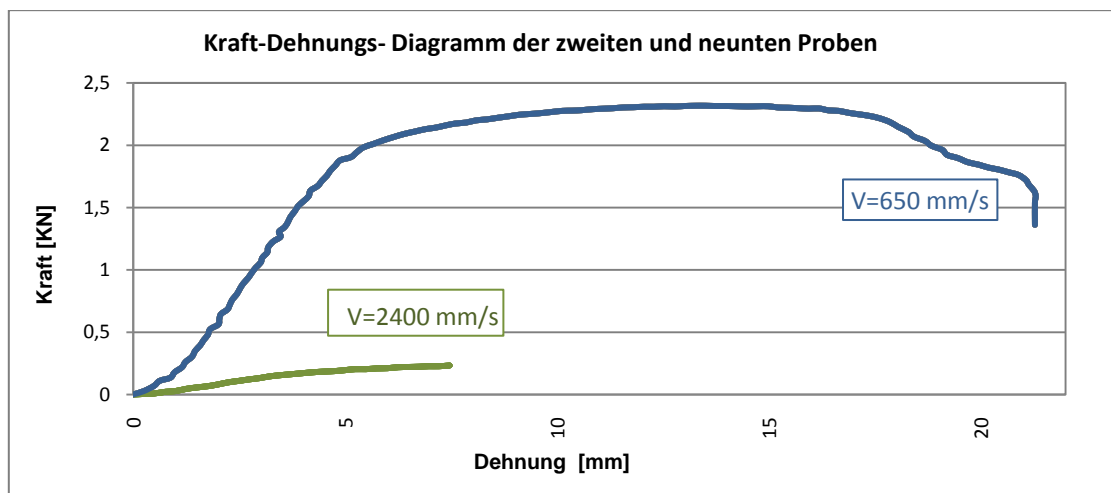


Abbildung 5-26: Vergleich zwischen Kraft-Dehnungs-Diagrammen der 2. und 9. Probe

5.6 Die Festigkeit in Abhängigkeit von der Schichtdicke

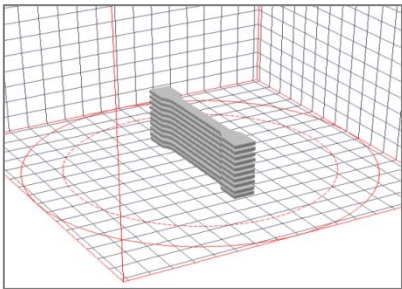
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Schichtdicke	Einflussgrößen: D_s : Schichtdicke	
Fill scan count=1, P_f = 7 W, Parallel Strategie Outline scan count=1, P_o =1.5 W $T=174^\circ\text{C}$, h_s = 0.15 mm, V_s =1257 mm/s. D_s = 0.08, 0.09, 0.1, 0.14, 0.18, 0.24, 0.28, 0.30 mm Anlage: DTM 2000 - 855		
8 x10 übereinander liegende Zugproben in der Bauraummitte aus derselben gebrauchten Pulvermischung.		

Abbildung 5-27: Anordnung der Y-Proben im Bauraum

Abbildung 5-27: Anordnung der Y-Proben im Bauraum

Ziel und Aufbau des Versuchs:

Die Schichtdicke, mit der ein Bauteil generiert wird, ist in dreierlei Hinsicht ein interessanter Parameter, da sie den größeren Einfluss auf die Prozesszeit, die mechanischen Eigenschaften und die Optik haben kann. Daher ist in der Regel ein Kompromiss zwischen diesen Faktoren zu finden, der in Bezug auf den speziellen Anwendungsfall das Optimum darstellt. Dabei gibt es keine speziellen Regeln, die einzuhalten sind, vielmehr beruht die Wahl der Parameter zu großen Teilen auf persönlicher Erfahrung und Einschätzung des Bedieners. So kann es beispielsweise bei Design-Modellen sinnvoll sein, eine längere Prozesszeit in Kauf zu nehmen und durch eine geringere Schichtdicke eine bessere Oberflächenqualität, mit kleineren Treppenstufen, zu erhalten. Generell gilt, dass die Optimierung eines Faktors zumeist negative Auswirkungen auf mindestens einen anderen hat.

Im Rahmen dieser Versuchsreihe ging es jedoch nicht um eine solche Optimierungsaufgabe, sondern sie diente vielmehr der bloßen Betrachtung der mechanischen Eigenschaften von Proben mit verschiedener Schichtdicke bei gleicher Laserleistung. Die so ermittelten Daten könnten in der späteren Anwendung einen gewissen Anhaltspunkt bei der Wahl des richtigen Werts, im Sinne der Bauteiloptimierung, für die Schichtdicke bieten.

Zur Durchführung der Zugversuche, wurden insgesamt 8 Bauprozesse, mit verschiedenen Schichtdicken und konstanter Laserleistung, à 10 Proben durchgeführt. Die Proben waren während des Bauprozesses übereinander in der Bauraummitte angeordnet und orthogonal zur Z-Achse der Maschine ausgerichtet. Neben der Schichtdicke selbst, musste noch ein anderer Parameter variiert werden, die *Left/Right Feed*

Distance. Dabei handelt es sich um die Höhe, um die sich der Boden des jeweiligen Vorratsbehälters (links oder rechts) anhebt und in Verbindung mit der Grundfläche des Vorratsbehälters das Pulvervolumen zum Auffüllen des Bauraums definiert. In DTM 2000 wird als Standard bei einer Schichtdicke von 0,1 mm eine *Left/Right Feed Distance* von 0,231 mm verwendet. Für größere Schicht-dicken reichte der Faktor 2,3 zwischen Schichtdicke und *Left/Right Feed Distance* nicht mehr aus, um den Bauraum komplett mit neuem Pulver zu beschichten und somit wurde hier empirisch ein Wert von (2,4 – 2,5) ermittelt und verwendet. Also:

$$\text{Feed Distance} = (2,4 - 2,5) \times D_s \quad \text{Formel 5-3}$$

Auswertung der Versuchsergebnisse

Aus den aufgezeichneten Werten des Zugversuchs wurde, zur Veranschaulichung der Ergebnisse, ein Diagramm erstellt, das in Abbildung 5-28 zu sehen ist.

Die einzelnen Datenpunkte repräsentieren hier jeweils den Mittelwert aus den Einzelwerten der zehn Proben einer Schichtdicke, wodurch Schwankungen bzw. Auswirkungen von „Ausreißern“ reduziert werden.

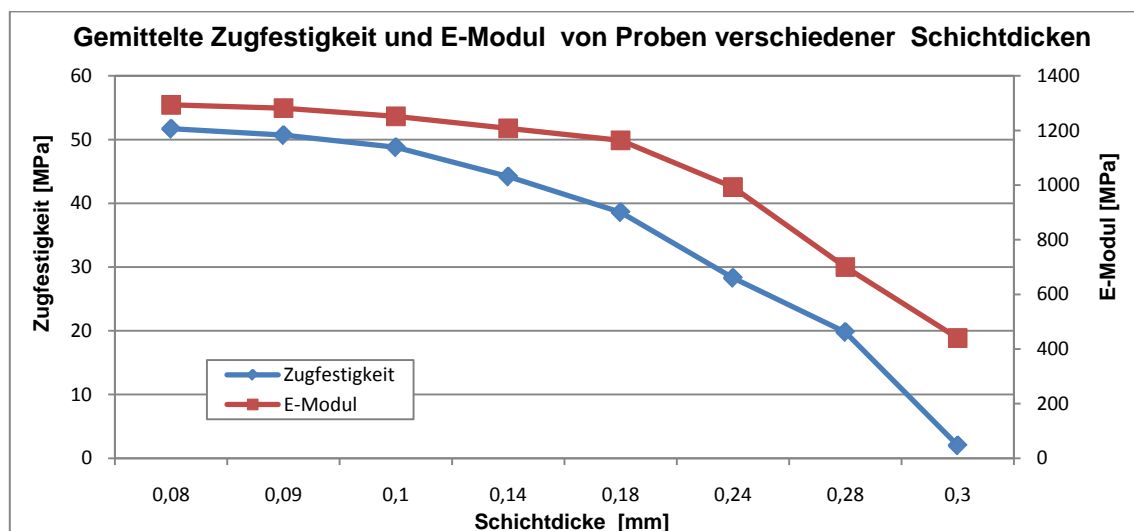


Abbildung 5-28: Zugfestigkeit und E-Modul von Proben verschiedener Schichtdicken

Bei Betrachtung der beiden Graphen ist der Abfall der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls mit zunehmender Schichtdicke deutlich zu erkennen. Diese ist auf den geringeren Versinterungsgrad zurückzuführen. Die in das Material eingebrachte Energie bleibt zwar konstant. Dazu steigt aber gleichzeitig das Volumen des zu versinterenden Pulvers aufgrund der größeren Schichtdicke und somit reicht die Volumenenergiedichte nicht mehr aus, um die aktuelle mit der vorherigen Schicht zu verbinden. Die Eindringtiefe des Lasers in der unteren Schicht wird immer kleiner, so-

dass nur ein kleiner Bereich dieser Schicht in eine Verbindung mit der oberen eingeht.

Die Probekörper mit 0,28 und 0,3 mm Schichtdicke scheinen an diesen Extremfall zu grenzen, da dort beim Bruch deutlich einzelne Schichten zu unterscheiden waren. Somit war keine einheitliche Querschnittsfläche mehr vorhanden, vielmehr wurde sie aus der Summe der jeweiligen Schichtquerschnitte gebildet. Anhand von Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30 lassen sich die variierenden Ausprägungen der Bruchstellen von Proben mit 0,10 mm und 0,28 mm Schichtdicke feststellen.

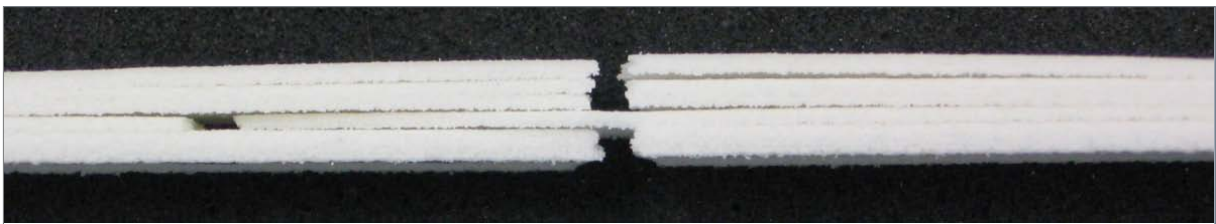


Abbildung 5-29: Bruchstelle einer Probe mit 0,28 mm Schichtdicke (Seitenansicht)

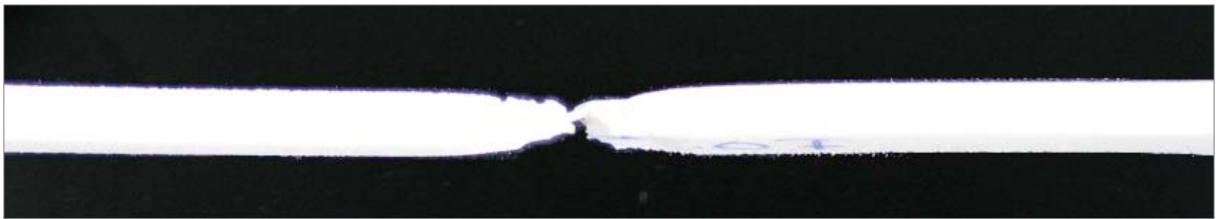


Abbildung 5-30: Bruchstelle einer Probe mit 0,10 mm Schichtdicke (Seitenansicht)

Weiterhin lässt sich erkennen, dass bei den Proben mit 0,10 mm Schichtdicke eine deutliche plastische Verformung, in Form einer Einschnürung, vorhanden ist, wohingegen die einzelnen Schichten der Probe mit 0,28 mm Schichtdicke vor dem Bruch scheinbar nur elastisch verformt wurden.

Diese Beobachtung ist besonders interessant, wenn zusätzlich die Änderung der Reißdehnung mit zunehmender Schichtdicke in Betracht bezogen wird. Abbildung 5-31 zeigt ein derartiges Diagramm.

Zu erkennen ist, dass die Reißdehnung mit zunehmender Schichtdicke prinzipiell abnimmt, da die schwächeren Verbindungen zwischen den einzelnen Partikeln, bei großer Schichtdicke, weniger Energie aufnehmen können und somit schon bei einem geringeren Verformungsgrad brechen. Ein solches Verhalten lässt sich ganz deutlich mittels der Messdaten nachweisen, wie der Graph in Abbildung 5-31 verdeutlicht.

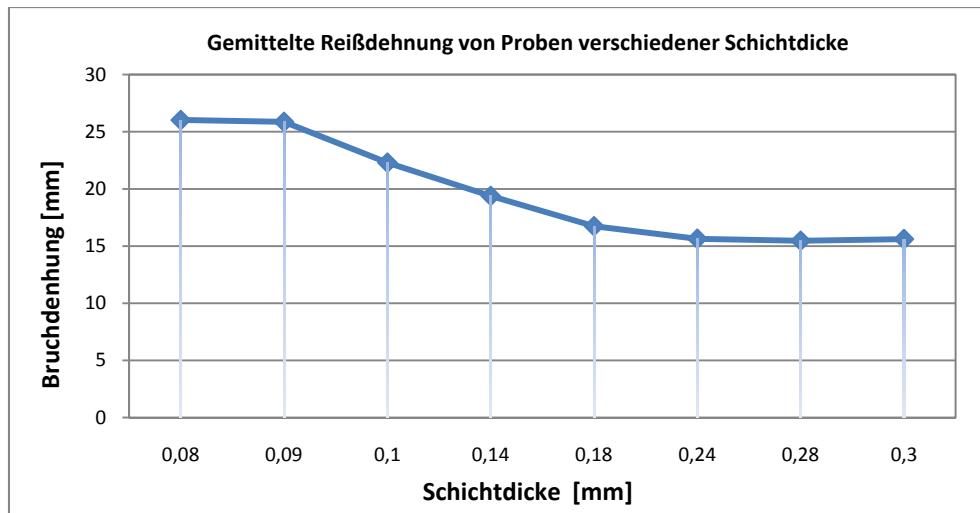


Abbildung 5-31: Reißdehnung von Proben verschiedener Schichtdicke

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und die Reißdehnung mit zunehmender Schichtdicke bei gleichbleibender Laserleistung, aufgrund sinkender Energiedichte, verringern. Des Weiteren konnte bei kleiner Schichtdicke elastische und plastische Verformung beobachtet werden, bei großen Schichtdicken kam es vor dem Bruch der Probe nur zu elastischer Verformung. Maximale Zugfestigkeit wurde mit der kleinsten Schichtdicke von 0,08 mm erreicht. Die Frage bleibt aber, welche Kombination von Laserleistung und Schichtendicke optimal (hinsichtlich der Beschleunigung des Bauprozesses) für den Bauprozess ist. Diese Frage ist in weiteren Versuchen zu beantworten, in welchen bei einer konstanten Volumen-Energiedichte einzelne Prozessparameter variiert werden(vgl. Kapitel 5.10).

5.7 Die Energiedichte E_m beim Laser-Sintern

Die zum Schmelzen des Pulvers benötigte Wärmemenge oder thermische Energie E_{th} lässt sich mit Hilfe der Formel 3-4 errechnen:

$$E_{th} = \Delta Q = m \times C_p \times \Delta T \quad [31] \text{Formel 5-4}$$

Mit:

C_p : Die Spezifische Wärmekapazität des Pulvermaterials für Polyamid 12

1,7 kJ/kg.K [32].

ΔT : Die Temperaturänderung zwischen der Umgebungstemperatur T_U

und der Schmelztemperatur T_m des Pulvers K.

Diese Energie hat beim Laser-Sintern von Thermoplasten zwei Quellen:

- 1. Die Heizstrahlung:** Das Pulver soll vor der Bauphase bis ca. 10 °C unterhalb seiner Schmelztemperatur (nämlich bis ca. 174 °C bei PA 12) vorgewärmt werden. Diese Temperatur ist vor allem von dem technischen Zustand der Anlage und von dem Pulverzustand abhängig. Um das zu gewährleisten, ist die Sinterstation® 2000/2500 mit 4 Heizungen ausgestattet (vgl. Abbildung 5-32). Die Hauptwärmezufuhr wird durch eine Infrarot-Ringheizung (Part Heater) geliefert. Dazu gibt es eine Heizung unter der Plattform (Piston Heater) und zwei andere Infrarotheizungen (Feed Heater) über den Vorratsbehältern.

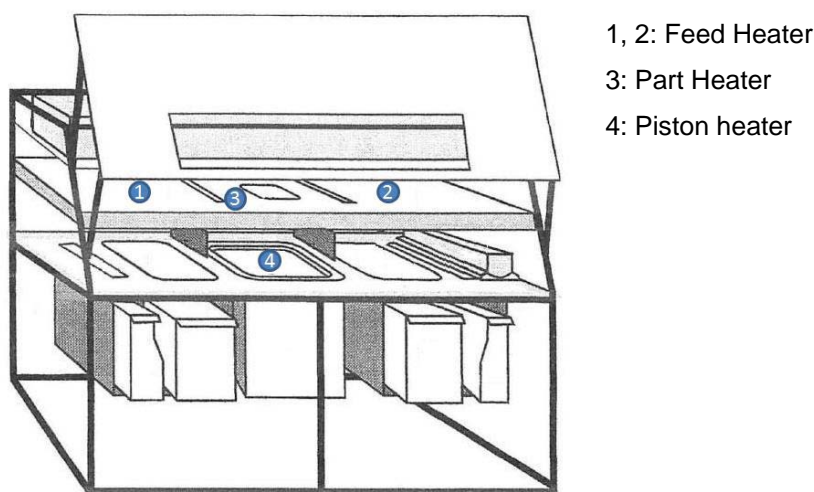


Abbildung 5-32: Sinterstation® DTM 2500 - Heater

Dieser Energieanteil kann für jede beliebige Materialschicht und somit für jedes einzelne Bauteil gemäß der Formel 5-4 errechnet werden: Z. B. beträgt die durch die Heizstrahlung gelieferte Wärme bei einer Umgebungstemperatur $T_U = 25\text{ °C}$ für eine einzige Schicht des im Kapitel 6.2.1 verwendeten Testkörpers:

$$E_{th} = m \times c_p \times \Delta T = \rho \times V \times c_p \times (T_v - T_U) =$$

$$= 1,04 \times 10^{-6} [\text{kg/mm}^3] \cdot (20 \times 30 \times 0,1) [\text{mm}^3] \cdot 1,7 [\text{kJ/kg.K}] \cdot (174 - 25) [\text{K}] = 15,8 \text{ J}$$

Mit:

ρ : Die Materialdichte von PA 12 $1,04 [\text{g/cm}^3]$ ⁽³²⁾

V : Das spezifische Materialvolumen einer Pulverschicht bei $D_s = 0,1 \text{ mm}$

T_v : Die Vorwärmtemperatur für das PA12 174 °C

2. Die Laserstrahlung :

Ein Laserstrahl kann als die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle beschrieben werden. In dieser Welle wird die transportierte Strahlungsenergie periodisch zwischen elektrischen und magnetischen Feldern ausgetauscht. In nicht absorbierenden Medien geschieht dies verlustfrei, in absorbierenden wird ein Teil der Energie an das Medium abgegeben und in Wärme umgewandelt [47].

Beim Lasersintern werden die Teile schichtweise generiert, wobei die Erstellung jeder Schicht an sich zeilenweise erfolgt. Die für die Belichtung einer Sinterlinie mittels des Lasers zur Verfügung gestellte Energie wird durch die Laserleistung P_f und die Scangeschwindigkeit v_s daher durch die sogenannte Streckenenergie E_s bestimmt:

$$E_s = \frac{\tau \cdot P_f}{L} = \frac{P_f}{v_s} \text{ [W/mm.s}^{-1}\text{]} \quad \text{Formel 5-5 (18)}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot W_0}{v_s} \text{ [s]} \quad \text{Formel 5-6 (nach Keller)}$$

Mit:

L : die Länge der betrachteten Sinterlinie [mm]

τ : die Einwirkzeit des Lasers [s]

W_0 : Laserstrahlradius [mm]

Bei der Sinterstation[®] DTM 2000 und bei einer Vorwärmtemperatur von ca. 174°C beträgt die Obergrenze der E_s für PA12 ca. 9,5 mJ/mm. Jede Schicht mit der Breite B besteht aus Überlappung von N benachbarten Scanlinien:

$$N = \frac{B}{h_s} \quad \text{Formel 5-7}$$

Die Scangeschwindigkeit V_s in die Scanrichtung und der Linienabstand h_s in die Vorschubsrichtung bleiben während der Belichtung des Querschnittes einer Schicht konstant. Unter diesen Voraussetzungen errechnet sich die Flächenenergie E_A über die in der Gesamtsinterzeit einer Schicht t_{ges} und mit der Laserleistung P_f belichteten Sinterlinien.

Mit

$$t_{ges} = N \times t_x = \frac{B}{h_s} \cdot \frac{L}{v_s} \quad \text{Formel 5-8 (18)}$$

folgt, dass (Nach Fahrer)

$$E_A = P_f \times t_{ges} = \frac{A \cdot P_f}{h_s \cdot v_s} \quad \text{Formel 5-9}$$

A: Schichtoberfläche [mm²]

t_{ges} : Die gesamte Sinterzeit für den Schichtquerschnitt A [s]

Wenn die durch den Laser eingebrachte Energie auf den Schichtquerschnitt A bezogen wird, ergibt sich die mittlere Energiedichte pro Flächeneinheit E_f (in Anlehnung an die internationale Norm DIN EN ISO 11145 [48]):

$$E_f = \frac{P_f}{h_s \cdot v_s} \quad [\text{J/mm}^2] \quad \text{Formel 5-10}$$

Mit der Hilfe der mittleren Energiedichte (Flächenenergiedichte) kann die maximale Energie, die eine bestimmte Fläche bei einer bestimmten Vorwärmtemperatur in sich aufnehmen und verarbeiten kann, ermittelt werden. Die maximale Flächenenergiedichte von PA12 beträgt bei Vorwärmtemperatur von 174 °C ca. 50 mJ/mm². Wenn diese Obergrenze der Energiedichte pro Flächeneinheit überschritten wird, kommt es zu einer Materialzersetzung an der Schichtoberfläche. (vgl. Kapitel 5.10)

Aber um die benötigte Laserenergie für das Schmelzen eines bestimmten Materialvolumens und daher für eine bestimmte Schichtdicke zu bestimmen, gibt es eine andere Prozesskenngröße, die das Zusammenwirken von Laserleistung, Linienabstand, Scangeschwindigkeit und der Schichtdicke beschreibt, und zwar die Energiedichte pro Volumeneinheit E_v . Denn die Verbindung zwischen den übereinanderliegenden Schichten und damit den Zusammenhalt für das ganze Bauteil wird durch die Eindringtiefe des Lasers bestimmt. Je größer die Schichtdicke ist, desto größer soll die Eindringtiefe des Lasers sein und desto größer soll die Volumenenergiedichte sein.

Die Volumenenergiedichte ist direkt proportional zur Strahlleistung P_f , sowie antiproportional zum Linienabstand h_s , der Schichtdicke D_s und der Scangeschwindigkeit v_s .

$$E_V = \frac{P_f}{h_s \cdot v_s \cdot D_s} \quad [\text{J/mm}^3] \quad \text{Formel 5-11} \quad [31]$$

Da die mittels der Ringheizung gelieferte Wärme idealerweise eine fast konstante Vorwärmtemperatur über die gesamte Bauplattform garantiert, wird sie in der folgenden Betrachtung nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden zunächst die kontrollierbaren Bereiche verschiedener Prozessparameter in Bezug auf die konstant bleibende Festigkeit ermittelt. Anschließend wird getestet, welcher Parameter den großen Einfluss auf die Zugfestigkeit hat.

5.8 Variation des Linienabstandes bei konstanter Energiedichte

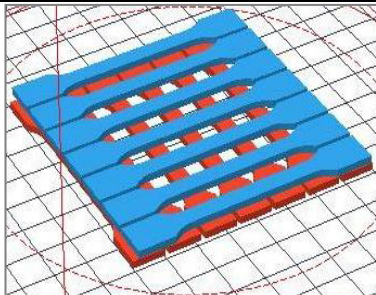
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von dem Linienabstand bei konstanter Energiedichte	Einflussgrößen: Linienabstand h_s [mm], Laserleistung P_f [W]		
<p> Fill Scan Count= 1, P_f= 3,7 – 11,7 [W], Parallel Strategie Outline Scan Count= 1, P_o=1.5 [W] T=174[° C], V_s=1257.53 [mm/s], D_s= 0.1 [mm] h_s= 0,08 – 0,25[mm] Anlage: DTM 2000 - 855 </p>			<p>Abbildung 5-33: Anordnung der Zugproben im Bauraum</p>
<p>2 x 7 nebeneinander liegende Zugproben in zwei Bauebenen (nach DIN EN ISO 527-1) aus derselben aufgefrischten Pulvermischung.</p>			

Abbildung 5-33: Anordnung der Zugproben im Bauraum

Versuchsziel und -aufbau:

Um herauszufinden ob die negativen Einflüsse der zu großen Linienabstände sowie der zu kleinen Linienabstände bei Y-Proben auf die mechanischen Eigenschaften der Testkörper (vgl. Kapitel 5.4) durch die Konstanthaltung der Energiedichte verhindert oder reduziert werden können, werden hier 14 Zugproben in zwei Reihen gebaut. In der unteren Reihe lagen Y-Proben und in der oberen X-Proben. Alle Proben wurden mit Parallel –Scanstrategie generiert (vgl. Abbildung 5-33)

Um eine gleichbleibende Energiemenge sicherzustellen, muss in diesem Fall die äquidistante Steigerung des Linienabstandes durch eine proportionale Erhöhung der Laserleistung kompensiert werden. Die benötigte Laserleistung für jeden eingestellten Linienabstand wird mit Hilfe der Formel 5-11 bei $E_V = 0,371 \text{ J/mm}^3$ berechnet.

$$\rightarrow P_f = (E_V \times v_s \times D_s) \cdot h_s \quad \text{Formel 5-12}$$

In jeder Schicht werden sieben Zugproben mit folgenden variablen Prozessparametern gebaut.

Probe Nr.	1	2	3	4	5	6	7
h_s [mm]	0,08	0,1	0,12	0,15	0,18	0,21	0,25
P_f [W]	3,7	4,7	5,6	7	8,4	9,8	11,7

Tabelle 5-2: Die eingestellten Linienabstände und deren angepassten Laserleistungen

Der maximale Wert für den Linienabstand ($h_s = 0,25$ mm) wurde in Bezug auf die Obergrenze der Streckenenergie ermittelt (vgl. Kapitel 5.7).

Auswertung der Versuchsergebnisse

Anhand der Zugfestigkeitsdiagramme (vgl. Abbildung 5-34), kann festgestellt werden, dass die gemessene Zugfestigkeit der Proben innerhalb der jeweiligen Gruppen relativ stabil verläuft.

Die Zugfestigkeitskurven verlaufen parallel zueinander und unterliegen niedrigen Schwankungen. Die Ergebnisschwankungen innerhalb der Gruppen betragen maximal 1,7 MPa bei Y-Proben und 2,2 MPa bei X-Proben, was einem Verhältnis von 3-4 % widerspiegelt.

Ein Vergleich zwischen den Zugfestigkeitsdiagrammen (vgl. Abbildung 5-18 & Abbildung 5-34) zeigt, dass die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Zugfestigkeit in dem Bereich von $h_s = 0,08 - 0,25$ mm bei X-Proben und in dem Bereich von $h_s = 0,1 - 0,25$ mm bei Y-Proben von 20,73 % auf 0,95 % bei X- und von 11,35 % auf 1,33 % bei Y-Proben abgesunken ist.

Bei den mit konstanter Laserleistung und mit den kleinsten Linienabständen gebauten Y-Proben betrug die Zugfestigkeitsabnahme wegen der Wärmezunahme, die zu einer Übersinterung des Pulvers bzw. zu einer Materialersetzung führte, 39,6 %. Aber mit konstanter Energiedichte wurde hier die Laserleistung entsprechend des kleineren Linienabstandes von 7 auf 3,8 W herabgesetzt und damit blieb die Zugfestigkeit stabil (vgl. Abbildung 5-34). Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den E-Modul-Diagrammen zu sehen (vgl. Anhang 9). Die Stabilität der Messwerte der mechanischen Eigenschaften ist auf die Konstanz der Energiedichte (die Volumen- sowie auch die Flächenenergiedichte) zurückzuführen.

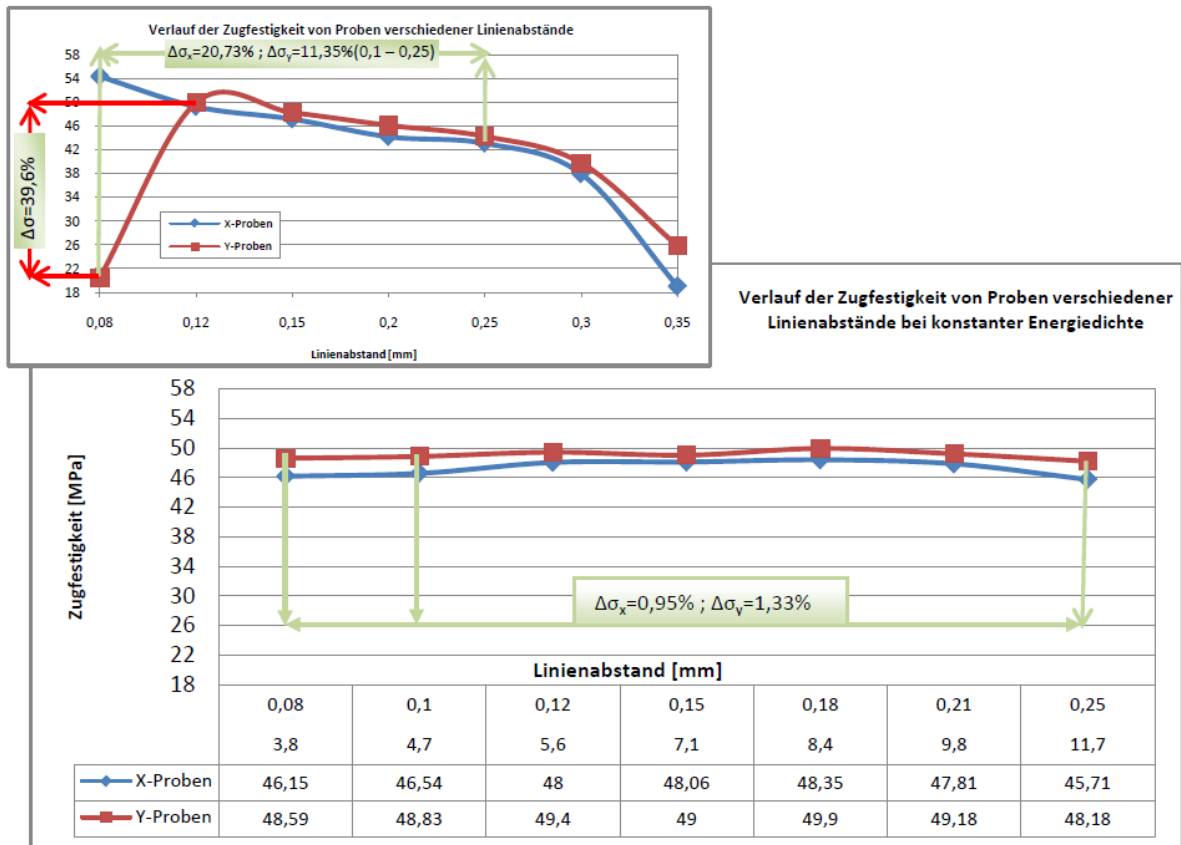


Abbildung 5-34: Verlauf der Zugfestigkeit von Proben verschiedener Linienabstände bei konstanter Energiedichte

Mit der proportionalen Erhöhung des Linienabstandes und der Laserleistung vergrößert sich die Energie des Laserstrahls, was zu einer Verbreiterung der Schmelzfläche führt (vgl. Abbildung 5-35). Dadurch bleibt der Überlappungsbereich zweier benachbarter Scanlinien genauso groß, wie bei kleineren Linienabständen. Die Verbindungskräfte zwischen den Scanlinien innerhalb jeder Schicht bleiben damit auch konstant.

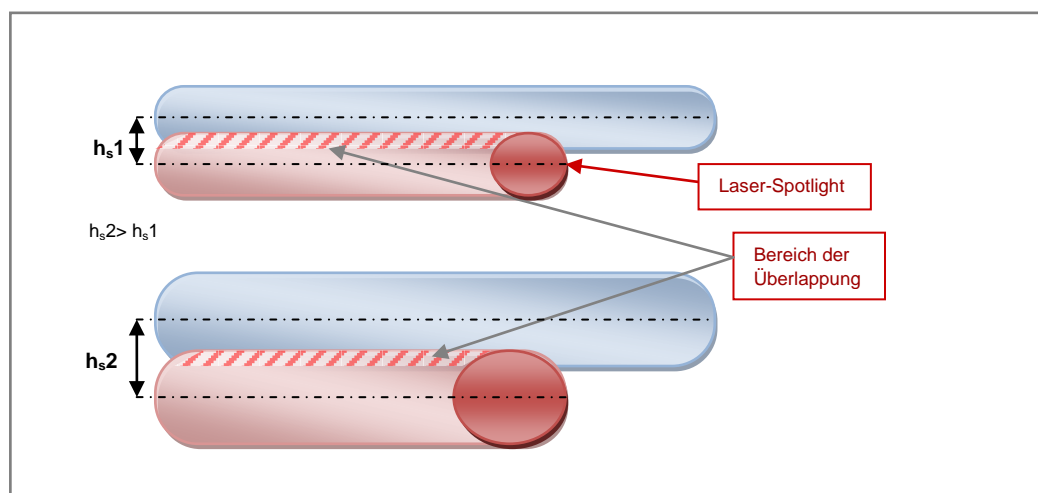


Abbildung 5-35: Vergrößerung der Linienabstände, Vergrößerung der Schmelzfläche

5.9 Variation der Scangeschwindigkeit bei konstanter Energiedichte

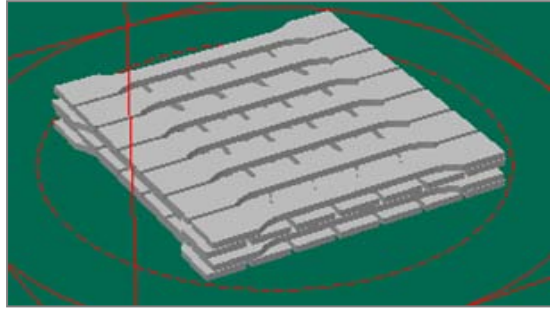
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	Einflussgrößen: Geschwindigkeit V_s , Füllaserleistung P_f
Fill Scan Count= 1, $P_f= 5-17,1$ [W], Outline Scan Count= 1, $P_o=1.5$ [W] $T=174[^\circ \text{C}]$, $D_s= 0.1$ [mm], $h_s= 0,15$ [mm], $V_s=893-3054$ [mm/s], Anlage: DTM 2000-855	
4 x 7 nebeneinander liegende Zugproben aus derselben aufgefrischten Pulvermischung (Altes Pulver+ 20% neues Pulver).	

Abbildung 5-36: Anordnung der Zugproben im Bauraum

Ziel und Aufbau des Versuchs:

Das Ziel des Versuchs ist, die Wirkung der proportionalen Änderung von Laserleistung und Geschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile zu untersuchen. Eine optimale Kombination der Lasergeschwindigkeit und Laserleistung in Hinsicht auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils und Beschleunigung des Bauprozesses, bei einer gegebenen unveränderten Energiedichte, ist zu finden.

Es werden 28 Zugproben gebaut. In den unteren zwei Reihen lagen die Proben, die mit der Parallel-Strategie belichtet sind; X-Proben in der ersten Reihe und Y-Proben in der zweiten Reihe von unten (vgl. Abbildung 5-36). Kreuz-Strategie wird in den zwei oberen Reihen angewendet, dabei sind wiederum die X-Proben in der dritten Reihe und Y-Proben in der vierten Reihe angeordnet.

Um eine konstante Streckenenergie E_s und somit auch konstante flächenbezogene Energiedichte zu gewährleisten, müssen die Scangeschwindigkeit und die Laserleistung in dem gleichen Verhältnis variiert werden. Die benötigte Laserleistung wird mit Hilfe der Formel 5-5 berechnet.

$$\rightarrow P_s = E_s \times v_s \quad [\text{W}]$$

mit $E_s= 0,0056$ J/mm für PA 12 bei Vorheiztemperatur von 174°C

In jeder Schicht werden sieben Zugproben mit folgenden Prozessparametern gebaut.

Probe	1	2	3	4	5	6	7
V_s [mm/s]	893	1000	1257,3	1589	1911	2393	3054
P [W]	5	5,6	7	8,9	10,7	13,4	17,1

Tabelle 5-3: Die eingestellten Geschwindigkeiten und deren angepassten Laserleistungen

Auswertung der Versuchsergebnisse

Auf den beiden Diagrammen (vgl. Abbildung 5-37 & Abbildung 5-38) verlaufen die Zugfestigkeitskurven fast gerade und parallel zueinander. Nur die erste X-Probe, die mit Parallelscan gebaut wurde, zeigt etwas schlechtere Messdaten, wobei die Zugfestigkeitsabnahme hier auch niedrig ist.

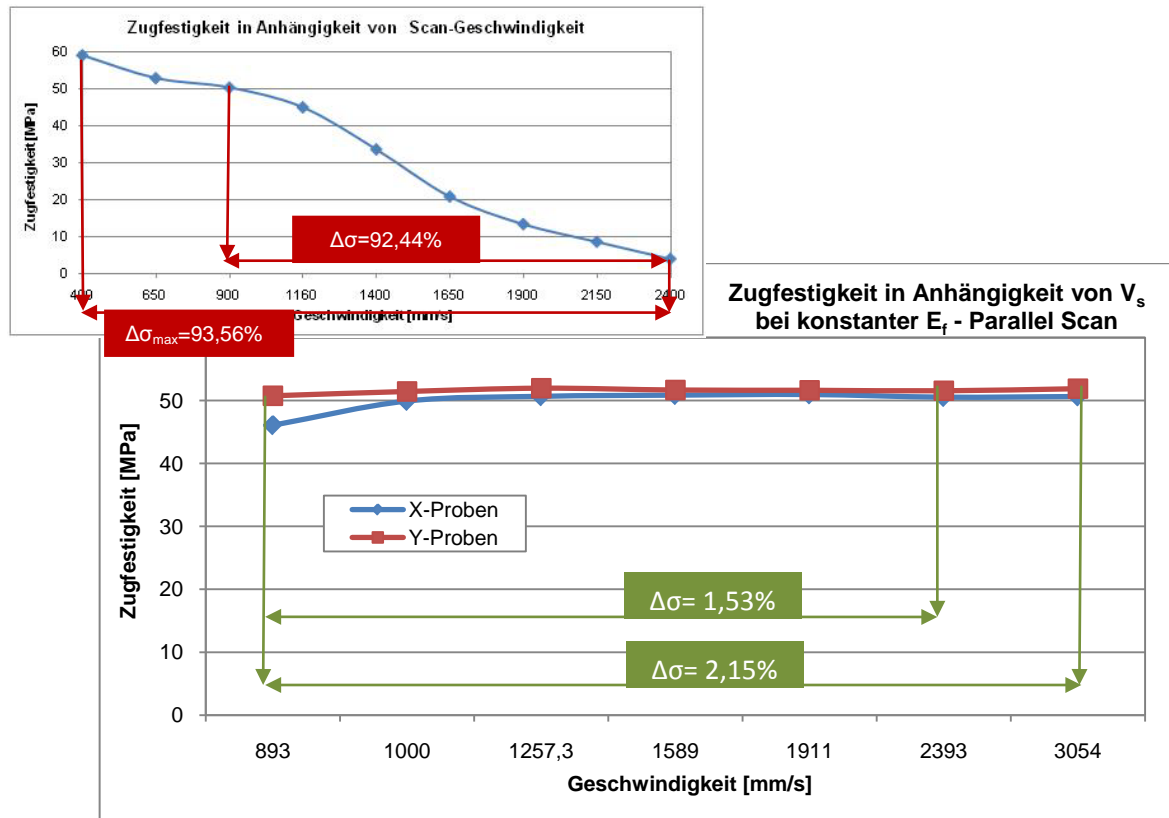


Abbildung 5-37: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit bei Konstanter Energiedichte (mit parallelskan)

Die Zugfestigkeitskurven bei den Proben mit Kreuzstrategie verlaufen auch gerade und ganz nahe und dicht aneinander. Sie zeigen sehr niedrige Schwankungen.

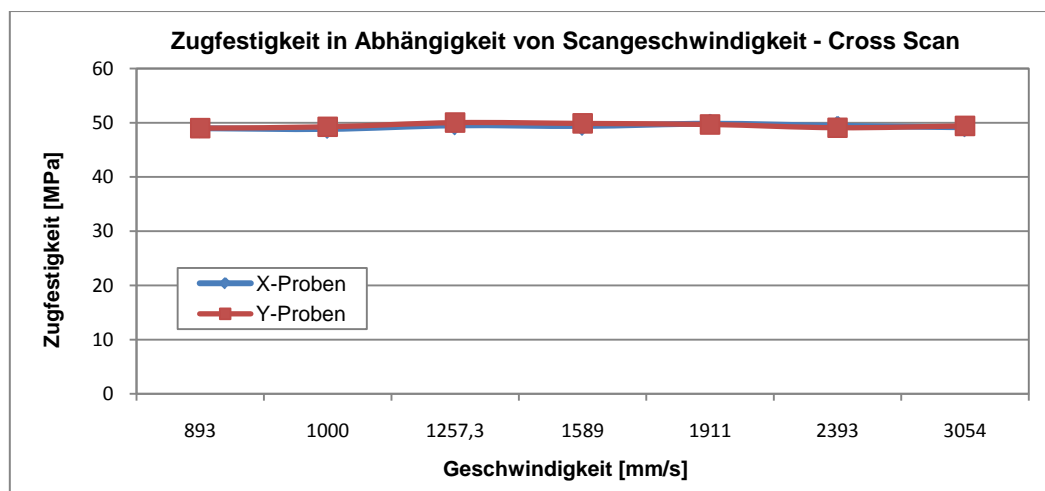


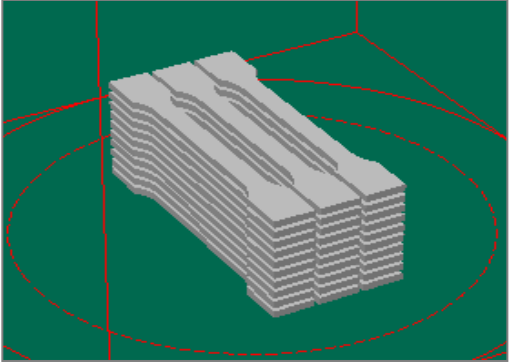
Abbildung 5-38: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Scan-Geschwindigkeit bei Konstanter Energiedichte (mit Kreuzscan)

Anhand der Zugfestigkeitsdiagramme, kann festgestellt werden, dass die gemessene Zugfestigkeit der Proben innerhalb der jeweiligen Gruppen relativ stabil verläuft. Bei den Proben mit Parallel-Strategie gibt es aber eine Ausnahme: die erste X-Probe hat eine um 4,53 MPa geringere Zugfestigkeit, was eine Abweichung von 8.3 % von dem Zugfestigkeitsmittellwert der anderen X-Proben darstellt. Das hängt mit der nicht angemessenen Abkühlzeit zusammen. Bei dieser Probe war die Abkühlzeit jedes einzelnen Punktes offensichtlich zu lang. Denn bei der Herstellung verläuft der Laserstrahl immer entlang der Probe. Im vorliegenden Fall wird die Zeitspanne t_x zwischen zwei nacheinander folgenden Scanvorgängen für jeden einzelnen Punkt dieser Probe so groß, dass es vor der zweiten Belichtung zu einer Erstarrung des Materials kommt und somit zu einer schwächeren Verbindung zwischen den einzelnen Linien innerhalb jeder Schicht, was die Zugfestigkeit dieser Probe beeinträchtigen wird. Dagegen ist die Schwankung der Messergebnisse bei der X-Probe, die mit der gleichen Geschwindigkeit aber mit Kreuz-Strategie generiert wurde, nicht so stark. Denn durch den ständigen Wechsel der Scanrichtung des Lasers wird die oben beschriebene negative Wirkung schwächer.

Insgesamt ist die Stabilität der gemessenen Werte der mechanischen Eigenschaften auf die Konstanz der Streckenenergie zurückzuführen. Das Material bekommt bei großen Geschwindigkeiten die gleiche Energiemenge, die dem Material auch bei kleineren Geschwindigkeiten mittels des Lasers pro Zeiteinheit zugeführt wird. Damit ist die entstandene Materialverbindung bei fast allen Zugproben gleich, was zu relativ konstanten Messergebnissen führt.

Durch die konstant gehaltene Energiedichte ist die maximalen Zugfestigkeitsdifferenz in dem Bereich von $v_s = 900 - 2400$ [mm/s] für die Y-Proben von 92,44 % bei konstanter Laserleistung auf 1,53 % bei konstanter Streckenenergie gesunken (vgl. Abbildung 5-24 & Abbildung 5-37).

5.10 Variation der Schichtdicke bei konstanter Energiedichte

Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei konstanter Energiedichte	Einflussgrößen: D_s : Schichtdicke P_f : Füllaserleistung	Abbildung 5-39: Anordnung der Zugproben im Bauraum 
Fill ScanCount=1, $P_f = 5,6 - 11,2$ W. Parallel- / Kreuzstrategie Outline scan count=1, $P_o = 1,5$ W $T = 174^\circ \text{C}$, $h_s = 0,15$ mm, $V_s = 1257,3$ mm/s. $D_s = 0,08 - 0,16$ mm Anlage: Sinterstation DTM 2000 - 855		
3 x 9 übereinander liegende Zugproben in der Bauraummitte aus derselben aufgefrischten Pulvermischung.		

Ziel und Aufbau des Versuchs:

Für die Beschleunigung des Bauprozesses wird die Erhöhung der Schichtdicken angestrebt. Dabei sollen aber die mechanischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund soll ein optimales Verhältnis zwischen der Schichtdicke und der Laserleistung in Hinsicht auf die Beschleunigung des Bauprozesses bei gegebener gleichbleibender Energiedichte pro Volumeneinheit ermittelt werden.

Es werden 27 Zugproben in 3 Reihen gebaut. In der mittleren Reihe befanden sich Zugproben, die mit der Kreuzstrategie belichtet wurden, die anderen zwei Probenreihen wurden mit der Parallelstrategie generiert (vgl. Abbildung 5-39).

Um die Stabilität der Energiedichte pro Volumeneinheit zu sichern, wird hier auch das Verhältnis zwischen der Schichtdicke und der Laserleistung konstant gehalten, so dass bei den größeren Schichtdicken eine entsprechend größere Laserleistung eingesetzt wird. Die benötigte Laserleistung für jede ausgewählte Schichtdicke wird mittels der Formel 5-11 berechnet.

$$\rightarrow P_s = (E_V \times h_s \times v_s) \cdot D_s$$

Reihe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_s [mm]	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
P_f [W]	5,6	6,3	7	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5	11,2

Tabelle 5-4: Die eingestellten Schichtdicken und deren angepassten Laserleistungen

Auswertung der Versuchsergebnisse:

Anhand der Zugversuchsdigramme ist eine gewisse Stabilität der Messwerte bei den ersten 6 Proben zu beobachten. Die Zugfestigkeitskurven verlaufen bei den ersten 6 Proben im Bereich zwischen 49,92 - 47,19 MPa, was eine Schwankung von

5,46 % widerspiegelt, danach fallen sie allmählich ab. Die letzten Zugproben mit den größeren Schichtdicken besitzen etwas niedrigere Zugfestigkeits- und E-Modul-Werte (vgl. Abbildung 5-40).

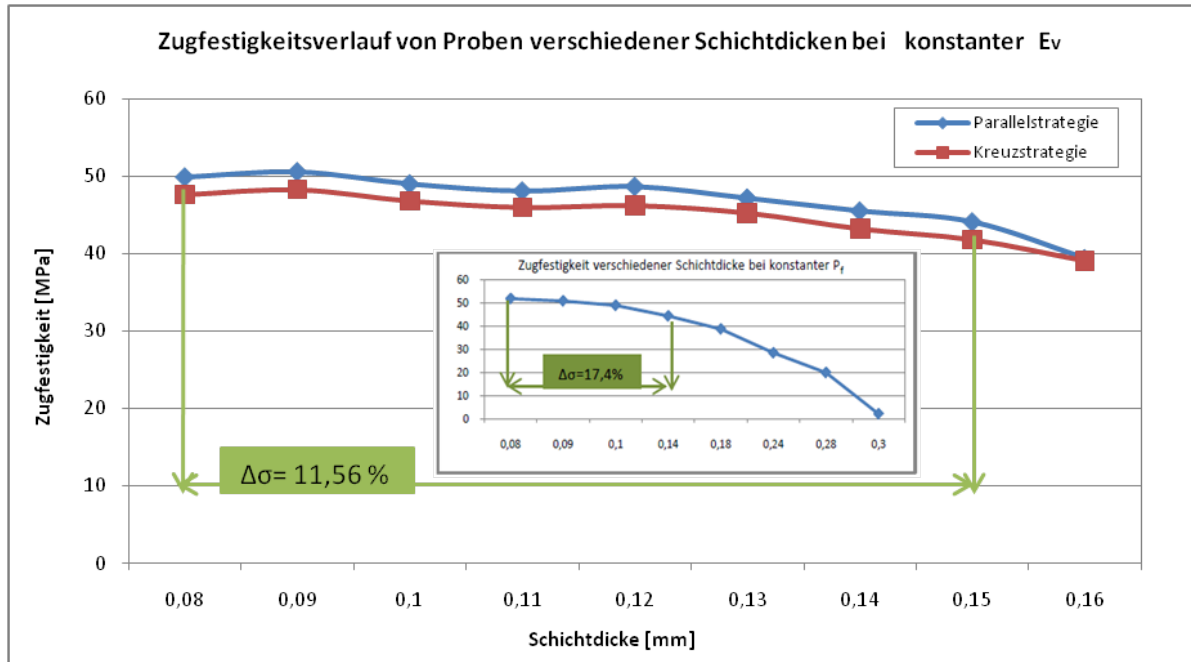


Abbildung 5-40: Zugfestigkeit von Proben verschiedener Schichtdicken bei konstanter Energiedichte

Die Stabilität der Messergebnisse wird durch die konstante E_v erklärt. Durch die erhöhte Laserleistung bleibt bei den Proben mit größeren Schichtdicken ($D_s = 0,12$ mm) der Verbindungsbereich zweier benachbarten Schichten genauso groß, wie bei den Proben mit kleineren Schichtdicken ($D_s = 0,08$ mm) und kleineren Laserleistungen, so dass eine feste Schichtenverbindung entsteht (vgl. Abbildung 5-41). Die schwächeren mechanischen Eigenschaften der Proben mit den größeren Schichtdicken, wie z. B. $D_s > 0,13$ mm, hängen mit der Tatsache zusammen, dass es bei zu großen Schichtdicken und dementsprechend bei einer zu großen Laserleistung zu einer Materialzersetzung kommt. Denn die Pulveroberfläche einer Schicht kann nicht eine viel zu große Energiemenge aufnehmen und verteilen. Die kritische Obergrenze der Flächenenergiedichte E_f darf nicht überschritten werden (siehe Kapitel 5.7-2). Diese Obergrenze wird für ein bestimmtes Material und bei einer bestimmten eingestellten Vorwärmtemperatur mit Hilfe der Formel 5-10 berechnet und beträgt erfahrungsgemäß für PA12 bei $T_v = 174$ °C ca. 50 [mJ/mm²]. Wie an der Formel 5-10 für die Flächenenergiedichte zu sehen ist, wird die Schichtdicke bei ihrer Berechnung nicht berücksichtigt. Deswegen wird bei den großen Schichtdicken, durch die Erhöhung der Laserleistung, um die Volumenenergiedichte konstant zu halten, die Energiemenge pro

Flächeneinheit steigen, sodass bei zu großen Laserleistung die Materialoberfläche überhitzt und das Material beschädigt wird, was an der gelblichen Farbe dieser Proben erkennbar ist.

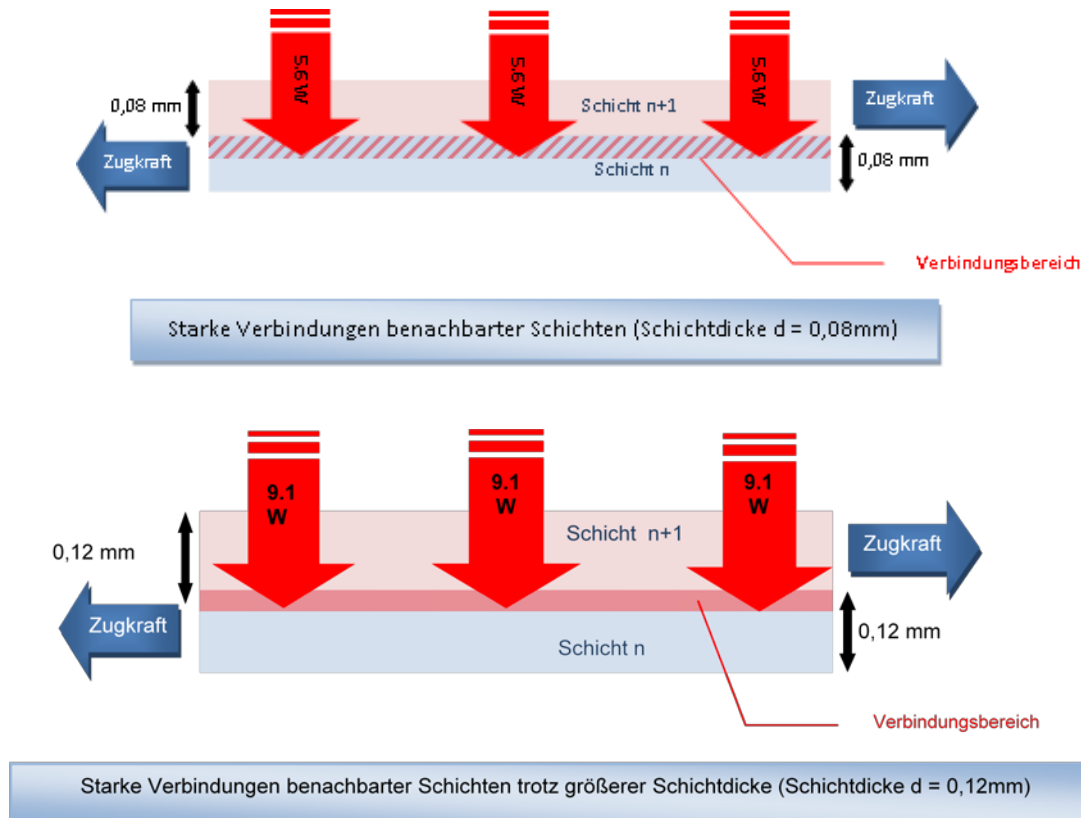


Abbildung 5-41: Überlappungsbereich unterschiedlicher Schichtdicken bei konstanter Energiedichte

Schlussfolgerung:

Durch die Konstanz der E_v wurde die Schwankung der Zugfestigkeit bei den Proben mit $0,08 \text{ mm} \leq D_s \leq 0,13 \text{ mm}$ trotz der verschiedenen Schichtdicken unter 5,46 % gemessen. Mit Hilfe der Flächenenergiedichte wird ein Bereich der Laserleistungen eingegrenzt, dessen Überschreitung zur Zersetzung des Materials führen kann.

Mit den Schichtdicken, die innerhalb dieses Bereiches liegen, kann der Bauprozess ohne große Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile gestaltet werden. Zur Beschleunigung des Bauprozesses empfiehlt sich dabei die Schichtdicke von $0,13 \text{ mm}$ als obere Grenze bei konstanter Energiedichte pro Volumeneinheit.

5.11 Die Einflusshöhe der Hauptprozessparameter auf die Zugfestigkeit

Nach den experimentellen Untersuchungen der Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften der LS-Bauteile und der Ermittlung ihrer stabilisierbaren Bereiche erfolgt die Ermittlung von der Einflusshöhe dieser Pa-

parameter nämlich der Laserleistung, des Linienabstands und der Scangeschwindigkeit auf die Festigkeit der hergestellten Bauteile.

Die Untersuchung der Einflusshöhe dieser Prozessparameter auf die Zugfestigkeit wird bei vier Flächen-Energiedichten, die durch die Variation dieser drei Hauptprozessparameter eingestellt werden, durchgeführt (vgl. Tabelle 5-5).

Ausgehend von sinnvollen oberen und unteren Einstellungen werden immer jeweils zwei Parameter konstant gehalten und nur ein Parameter variiert. Jede Versuchsreihe wird dreimal wiederholt.

Laserleistung	Linienabstand	Scangeschwindigkeit	Energiedichte	Variationsparameter
P_f [W]	h_s [mm]	v_s [mm/sec]	E_f [MJ/mm ²]	
12	0,15	5080	15,75	Laserleistung P_f
16	0,15	5080	20,99	
20	0,15	5080	26,25	
26	0,15	5080	34,12	
16	0,2	5080	15,75	Linienabstand h_s
16	0,15	5080	20,99	
16	0,12	5080	26,25	
16	0,09	5080	34,12	
16	0,15	6773,33	15,75	Scangeschwindigkeit v_s
16	0,15	5080	20,99	
16	0,15	4064	26,24	
16	0,15	3126,15	34,12	

Tabelle 5-5: Parametervariation mit oberen und unteren Einstellungen

In Abbildung 5-42 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe in Form von Haupteffekten auf die Zugfestigkeit dargestellt. Daraus können zwei klare Aussagen getroffen werden:

- 1- Die Zugfestigkeit steigt mit zunehmender Energiedichte bis zum Erreichen der Obergrenze der Energiedichte pro Flächeneinheit (in diesem Fall: Für die DTM 2500 und für PA12 bei Vorwärmtemperatur von 180 °C mit den o.g. eingestellten Parametern beträgt die Obergrenze für die Energiedichte pro Flächeneinheit: $E_{f,max} = 26,25 \text{ MJ/mm}^2$) (vgl. Tabelle 5-5) und dann fängt sie an, mit weiteren Erhöhung der Energiedichte abzusinken.
- 2- Der Einfluss der Laserleistung auf den Zugfestigkeitsverlauf ist stärker als der Einfluss der Scangeschwindigkeit und des Linienabstandes. Da die Laserleis-

tung den größten Einfluss auf die Temperatur der Pulveroberfläche ausübt, gefolgt vom Linienabstand und Scangeschwindigkeit.

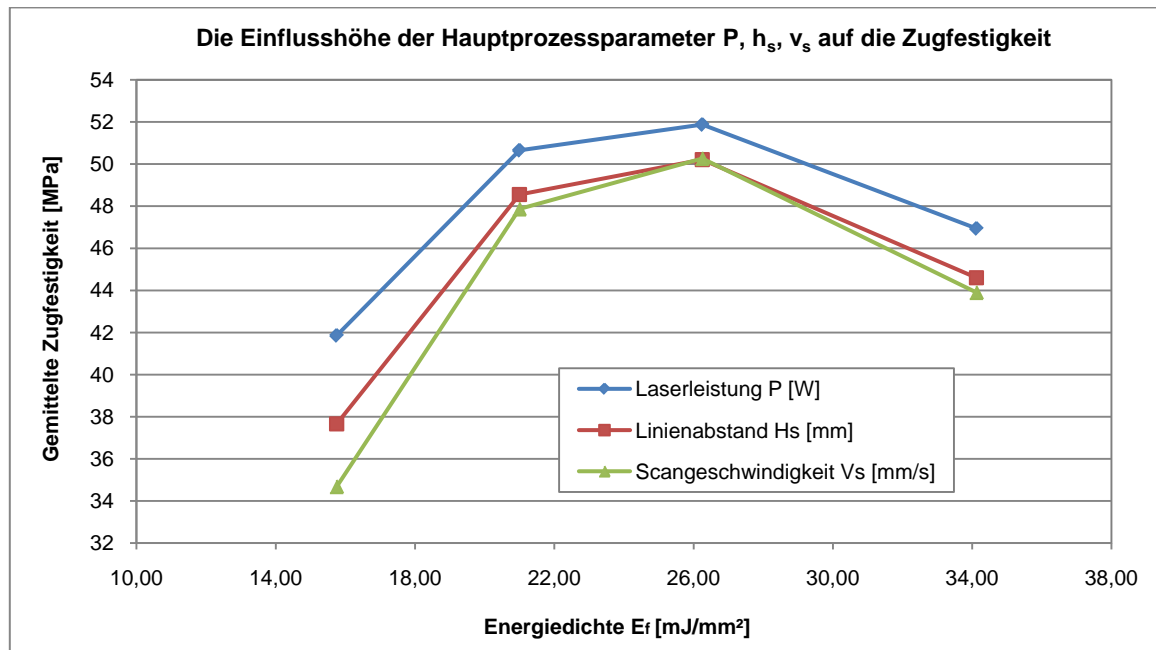


Abbildung 5-42: die Einflusshöhe der Variationsparameter auf die Zugfestigkeit bei bestimmten Energiedichten

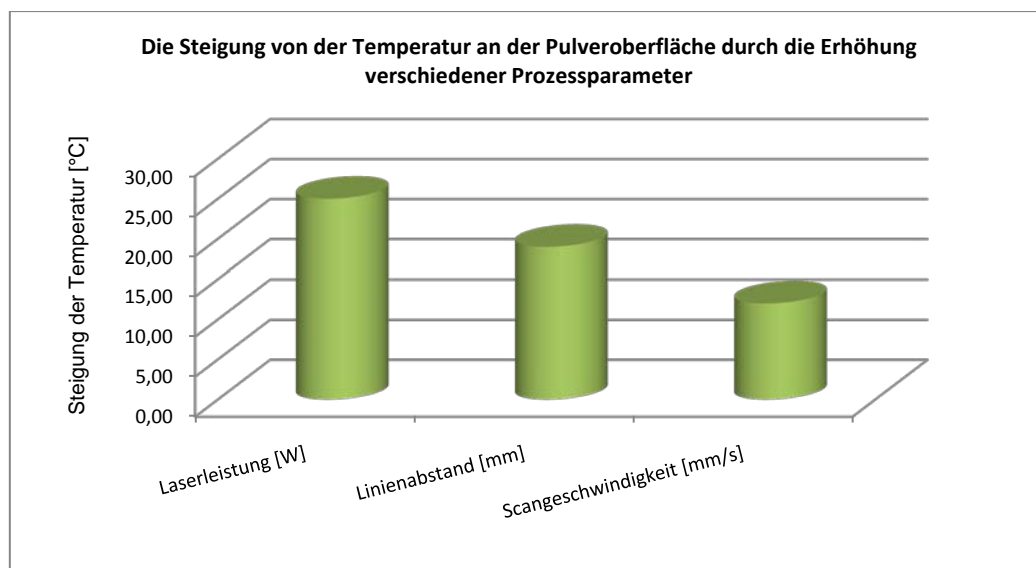


Abbildung 5-43: Die Haupteffekte verschiedener Prozessparameter auf die Steigung der Pulvertemperatur für PA12 [18]

Die Bestätigung dafür findet in der Arbeit von B. Keller statt. Er hat gefunden, dass sich eine Temperatursteigung von 25 °C an der Schichtoberfläche ergibt, wenn mittels der Erhöhung der Laserleistung die Energiedichte pro Flächeneinheit um 30 mJ/mm² höher eingestellt wird. Andererseits beträgt die Temperatursteigung ca. 18 °C bei der Verkleinerung des Linienabstandes und 12 °C durch die Reduzierung der Scangeschwindigkeit um die gleiche Steigerung der Energiedichte zu schaffen(vgl. Abbildung 5-43).

6 Die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die optischen Eigenschaften der LS-Bauteile

6.1 Messung und Auswertung von technischen Oberflächen

6.1.1 Begriffsklärung

Bei der Betrachtung von Werkstückoberflächen werden insbesondere die geometrisch-ideale, die wirkliche sowie die Ist-Oberfläche unterschieden. Die geometrisch-ideale Oberfläche begrenzt Werkstücke in technischen Zeichnungen bzw. CAD-Programmen und weist keine fertigungsbedingten Abweichungen auf. Sie kann in der Realität nicht erzeugt werden. Die wirkliche Oberfläche wird in DIN 4760 als „*jene Oberfläche, die den Gegenstand von dem ihm umgebenden Medium trennt*“ definiert [49]. Sie weist fertigungsbedingte Abweichungen auf, wird von Tastschnittgeräten gemessen und als Ist-Oberfläche vom Messsystem erfasst. Da kein Messverfahren eine absolut exakte Darstellung der wirklichen Oberfläche erzielen kann, stimmen die wirkliche Oberfläche und die gemessene Ist-Oberfläche zwangsläufig nicht überein [50].

Die durch das LS-Verfahren erzeugte und mittels Tastschnittgerät erfasste Oberfläche stellt, genau wie bei allen anderen Verfahren der Fertigungstechnik, lediglich eine Annäherung an die konstruktiven Vorgaben dar. Das Maß der auftretenden Abweichungen ist dabei weitestgehend verfahrens- und werkstoffspezifisch.

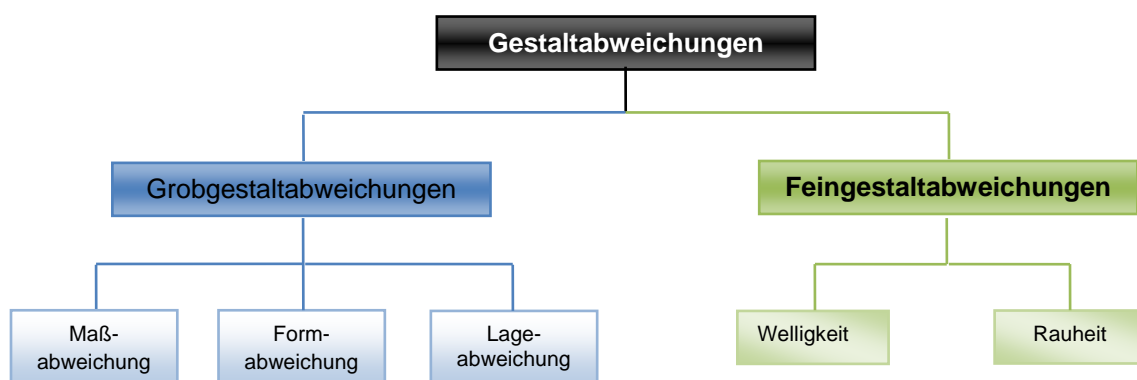


Abbildung 6-1: Unterteilung der Gestaltabweichungen [52]

Wie in Abbildung 6-1 dargestellt, lassen sich die auftretenden Fehler in die Gruppen Grobgestaltabweichungen mit den Ausprägungen Maß-, Form- und Lageabweichung sowie die Feingestaltabweichungen mit der Unterscheidung zwischen Welligkeit und Rauheit einteilen. Die Grobgestaltabweichungen sollen an dieser Stelle nur erwähnt und nicht weiter vertieft werden. Abbildung 6-2 zeigt die Unterteilung der Gestaltab-

weichungen gem. DIN 4760 in sechs Ordnungen, wobei mit steigender Ordnungszahl die Feinheit der Abweichungen zunimmt. Die betrachteten Feingestaltabweichungen sind in zweiter bis fünfter Ordnung aufgeführt.






Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)		Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 		Unebenheit Unrundheit	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 		Wellen	Außermittigte Einspannung oder Formfehler eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung: 	Rauheit	Rillen	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: 		Riefen Schuppen Kuppen	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Sandstrahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar		Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar		Gitteraufbau des Werkstoffes	Physikalische und chemische Vorgänge im Aufbau der Materie, Spannungen und Gleichungen im Kristallgitter
		Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung	

Abbildung 6-2: Einteilung der Gestaltabweichungen gem. DIN 4760

Die Welligkeit (2. Ordnung) umfasst regelmäßig und unregelmäßig wiederkehrende langwellige Anteile der Feingestaltabweichung. Sie wird beim LS unter anderem durch das Abfahren der Schichten mit dem Laserstrahl hervorgerufen und ist somit in jeder Schicht an den Sinterlinien zu finden. Unter dem Begriff der Rauheit sind allgemein Unebenheiten auf den Werkstückoberflächen zu verstehen. Sie finden sich in unterschiedlicher Ausprägung und Intensität auf allen Werkstückoberflächen^[49]. Gem. DIN 4760 wird die Rauheit in die dritte bis fünfte Ordnung unterteilt und umfasst Rillen an der Oberfläche (3. Ordnung), Riefen, Schuppen und Kuppen (4. Ord-

nung) sowie Abweichungen aufgrund von Fehlern in der Gefügestruktur (5. Ordnung) [51]. Letztere sind nicht im Tastschnittverfahren ermittelbar [52].

6.1.2 Messstrecken und Rauheitskennwerte

6.1.2.1 Messstrecken

Bei der Auswertung eines mittels Tastschnittverfahrens erstellten Oberflächenprofils, kommen aufgrund der genormten Berechnungsmethoden eine Reihe verschiedener Messstrecken zum Einsatz, die sich in Position und Länge voneinander unterscheiden (vgl. Abbildung 6-3).

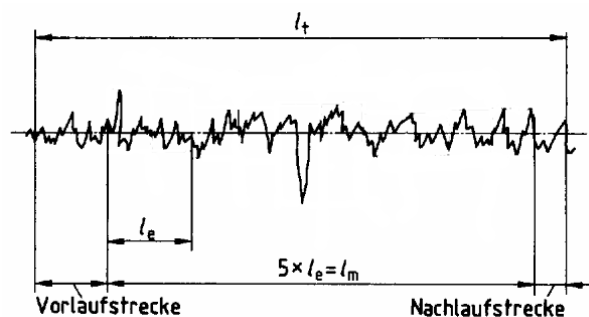


Abbildung 6-3: Unterteilung der Messstrecken [52]

Die Länge der Gesamttaststrecke l_t , also der Strecke vom Aufsetzen bis zum Abheben der Diamant-Tastspitze, setzt sich aus der Vorlaufstrecke l_v , der Gesamtmessstrecke l_m und der Nachlaufstrecke l_n zusammen. Sowohl der Vorlauf als auch der Nachlauf bezwecken eine Steigerung der Messgenauigkeit, indem anfängliche Einschwingvorgänge und verminderte Schlussgeschwindigkeiten, die das Messergebnis verfälschen, ausgeglichen werden.

In den vorliegenden Messungen wurde jeweils eine Gesamtmessstrecke von $l_m = 10$ mm gewählt. Die Länge der Einzelmessstrecke l_e beträgt ein Fünftel der Gesamtmessstrecke (hier: $l_e = 2$ mm).

6.1.2.2 Kennwerte:

Zur Untersuchung technischer Oberflächen existieren eine Vielzahl Kenngrößen, die sowohl in ihrem Anwendungsbereich als auch in ihrem Bekanntheitsgrad und ihrer Aussagekraft stark variieren. Im Folgenden werden zur Auswertung der erstellten Oberflächenprofile die drei Rauheitskenngrößen mit der größten industriellen Bedeutung (R_a , R_z , R_{max}) betrachtet.

Beim arithmetischen Mittenrauhwert R_a handelt es sich um einen international anerkannten Messwert für die Oberflächenqualität. R_a wird gem. Abbildung 6-4 ermittelt und entspricht der durchschnittlichen Abweichung des ermittelten Profils von der eingezeichneten Mittellinie.

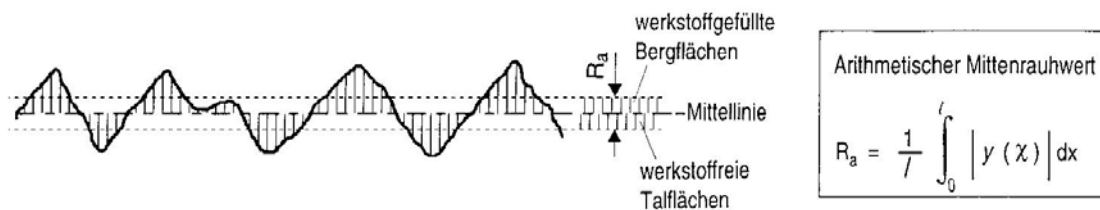


Abbildung 6-4: Ermittlung R_a [50]

Bei Betrachtung mehrerer Messstellen an einer Prüffläche unterliegt R_a nur einer geringen Streuung, lässt jedoch auch nahezu keine Aussage in Bezug auf Ausreißer zu.

Die gemittelte Rautiefe R_z ist, ebenso wie R_{\max} europaweit verbreitet. Sie ergibt sich als arithmetisches Mittel aus fünf Einzelrautiefen Z_1 bis Z_5 in fünf Einzelmessstrecken von der Länge l_e . Die Einzelrautiefen stellen den Abstand zwischen der höchsten Profilspitze und dem tiefsten Tal in der jeweiligen Einzelmessstrecke dar.

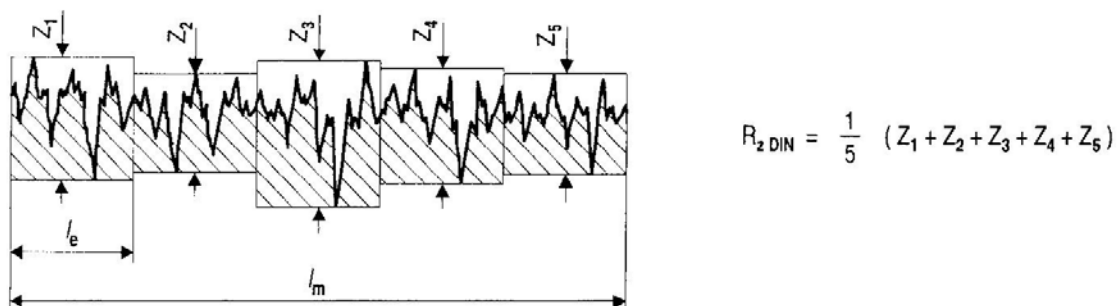


Abbildung 6-5: Ermittlung R_z nach DIN 4768 [50]

Abbildung 6-5 veranschaulicht die Ermittlung von R_z . Die Kenngröße ist in Bezug auf Ausreißer empfindlicher als R_a und weist somit bei Betrachtung mehrere Messstrecken eine stärkere Kennwertstreuung auf. Die maximale Rautiefe R_{\max} entspricht der größten Einzelrautiefe in den Einzelmessstrecken, die gem. der Ermittlung des Kennwertes R_z besteht. In Abbildung 6-5 entspricht R_{\max} der Einzelrautiefe Z_3 . R_{\max} ist dementsprechend die empfindlichste der betrachteten Rauheitskenngrößen in Bezug auf Ausreißer, so dass hier die gravierendste Kennwertstreuung zu erwarten ist.

6.2 Die Oberflächenrauheit in Abhängigkeit von den Prozessparametern

Aufgrund der verfahrensbedingten Pulverpartikelanhaftungen und des Stufeneffektes an den Bauteiloberflächen, des unvollständigen Sinterns der Pulverpartikel und der verwendeten Pulverkornfraktion steht die erreichbare Oberflächenqualität beim LS hinter derjenigen der Stereolithographie oder der konventionellen Fertigungsverfahren zurück. Deswegen ist eine nachträgliche Bearbeitung der lasergesinterten Teile meistens unumgänglich und gehört unbedingt zur der Prozesskette vom LS. Aber durch eine gezielte Optimierung der Prozessparameter kann der Nachbearbeitungsaufwand auf jeden Fall reduziert werden.

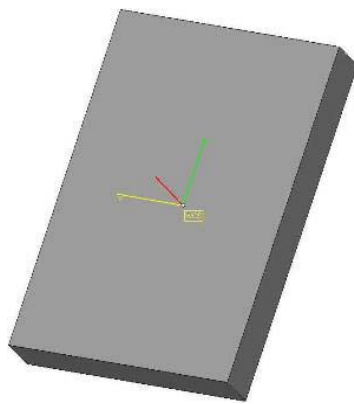


Abbildung 6-6: Testkörper für die Rauheitsmessung

Zur Untersuchung dienen in diesem Kapitel Testkörper in Form von Quader mit den Maßen $20 \times 30 \times 4 \text{ mm}^3$ (vgl. Abbildung 6-6). Da es in der Wirklichkeit kaum ein Bauteil ohne schräge oder gekrümmte Flächen gibt, werden diese Testkörper unter verschiedenen Neigungswinkeln von 0° bis 90° zur Bauebene gebaut, um den Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die Oberflächenrauheit realistischer zu testen. (vgl. Abbildung 6-10 & Abbildung 6-11)

Was die Parameter Scangeschwindigkeit, Linienabstand und die Scanstrategie betrifft, wurde experimentell nachgewiesen, dass diese Parameter bei konstanter E_f keinen deutlichen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit innerhalb ihrer ermittelten Variationsbereiche aufweisen (vgl. Abbildung 6-7 & Abbildung 6-8 & Abbildung 6-9).

Da bei der alternierenden Kreuzstrategie nur die Scanrichtung von Schicht zu Schicht um 90° gedreht wird, was einen Einfluss auf die Festigkeitsabhängigkeit von der axialen Orientierung in der X-Y-Ebene hatte, bleibt der durch das zeilenweise

Generieren der Schichtgeometrie entstehende Treppeneffekt genauso wie bei der Parallelstrategie erhalten (vgl. Abbildung 6-7). Deswegen bringt die alternierende Scanstrategie keine Verbesserung mit sich was die Oberflächenrauheit betrifft.

Die Scangeschwindigkeit des Fillasers hat auch bei konstanter Flächenenergiedichte und in dem Bereich von $V_s = 650 \text{ mm/s}$ bis 3054 mm/s weder negative noch positive Auswirkung auf die Oberflächenrauheit. Zwar wird bei der Erhöhung der Scangeschwindigkeit die Einwirkzeit des Lasers kürzer, gleichzeitig wird aber durch die Anpassung der Laserleistung die durch den Laser eingebrachte Energie auch größer, sodass die Energie pro Längeneinheit konstant bleibt und somit auch die Oberflächenrauheit (vgl. Abbildung 6-8). Dabei stellt der Geschwindigkeitswert von 3054 mm/s die maximale einstellbare Scangeschwindigkeit der Sinterstation[®] DTM 2000 dar.

Bei einem Linienabstand von $0,25 \text{ mm}$ und einer dazu passenden Laserleistung von $11,7 \text{ W}$ wird jeder Punkt an der Schichtoberfläche mindestens zweimal nacheinander belichtet und ein Überlappungsbereich von $0,15 - 0,2 \text{ mm}$ bleibt immer gewährleistet und somit bleiben die Rauheitswerte genauso wie bei kleinerem Linienabstand unverändert (vgl. Abbildung 6-9).

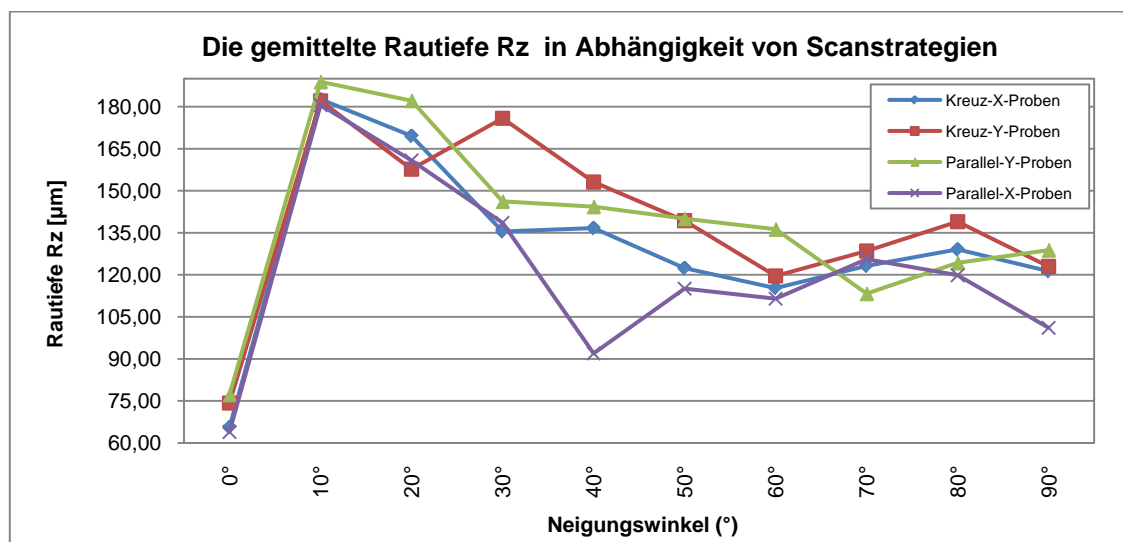


Abbildung 6-7: Die gemittelte Rautiefe R_z in Abhängigkeit von Scanstrategien

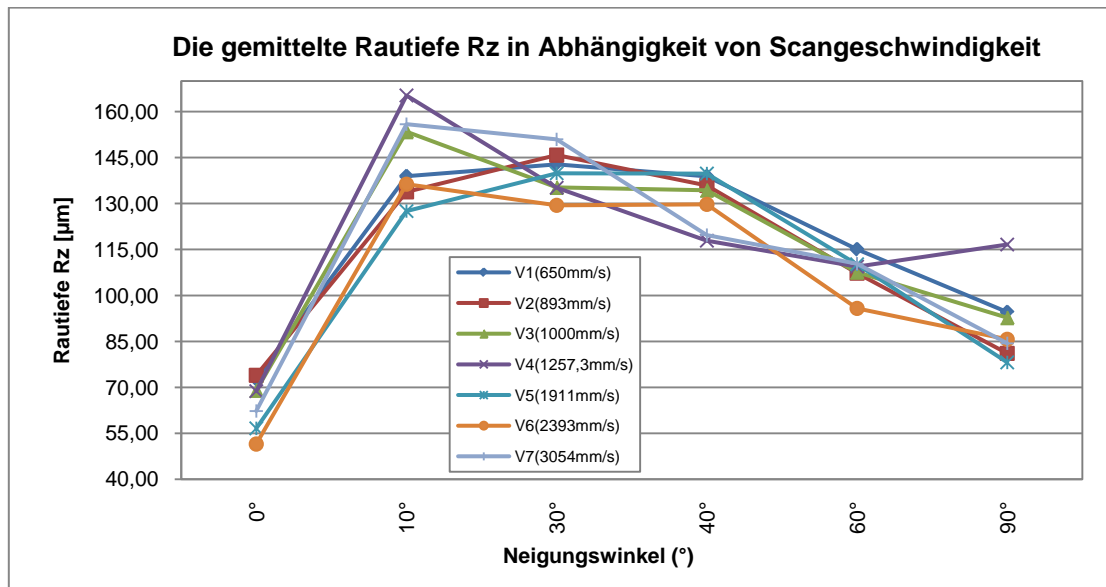


Abbildung 6-8: Die gemittelte Rautiefe R_z in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit

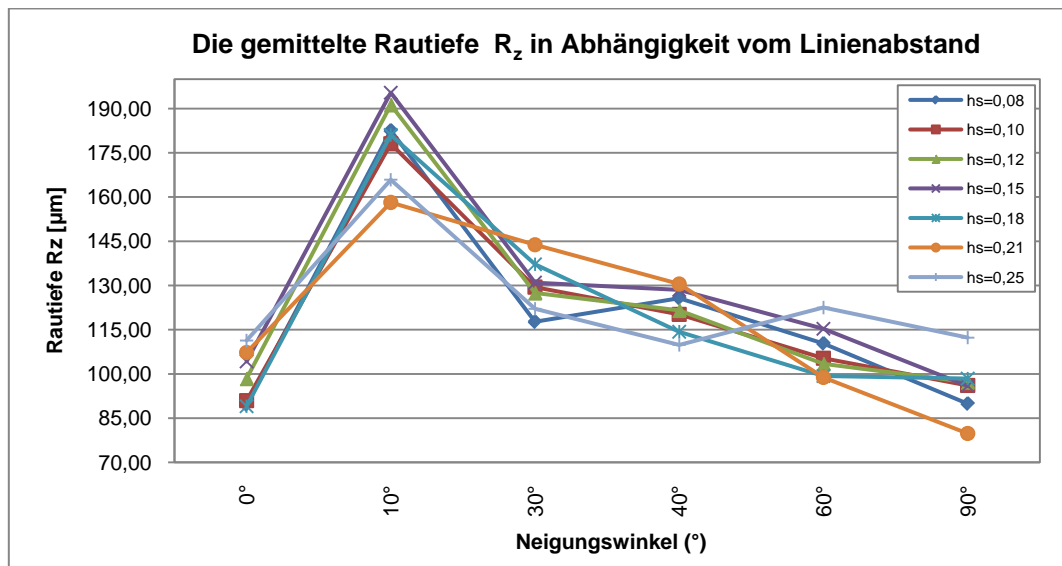


Abbildung 6-9: Die gemittelte Rautiefe R_z in Abhängigkeit vom Linienabstand

6.2.1 Wirkung der Outline-Funktion auf die Oberflächenrauheit

Nach der Schichtgenerierung werden die Innen- und Außenkonturen jeder Schicht mit dem Outlinelaser belichtet, um die Oberflächenqualität zu verbessern. Durch entsprechende Untersuchungen sollte überprüft werden, ob die Outline-Funktion tatsächlich einen positiven Einfluss auf die Oberflächenqualität hat.

Nach Sauer erhöht der Einsatz von Outline-Funktion die Oberflächenrauheit für einen Flächenwinkel bis 50° um maximal 20 μm , für größere Winkel ist die Rauheit um bis zu 10 μm erhöht und durch den Einsatz von Outlinelaser gibt es nur eine subjektiv wahrnehmbare optische Verbesserung der Oberflächenqualität von Seitenflächen.

In dieser Arbeit wurden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Anlagen durchgeführt, um zu überprüfen, inwieweit sich die Outline-Funktion (Outline-Laserleistung, -Scangeschwindigkeit, -Einsatzreihenfolge und die Anzahl der Belichtungen) auf die Oberflächenrauheit auswirken.

Anhand der ermittelten Rauheitsdiagramme lässt sich direkt feststellen, dass die Oberflächenrauheit zum großen Teil von der Lage der betrachteten Fläche zur Bauebene während des Bauprozesses abhängt. Die maximal Rauheit wurde bei Neigungswinkeln von 5°- 30° gemessen. Da in diesem Winkelbereich der Abstand zwischen den sich nach oben gewölbten Schichträndern am größten ist. (vgl. Abbildung 6-10 & Abbildung 6-11).

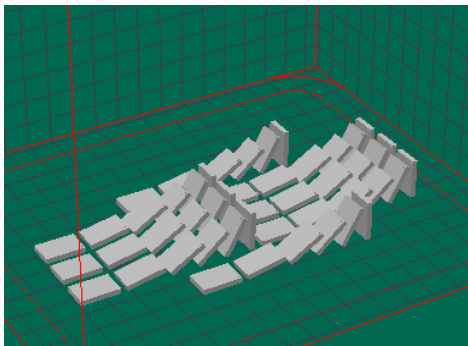


Abbildung 6-10: Anordnung der Testkörper im DTM2500-Bauraum

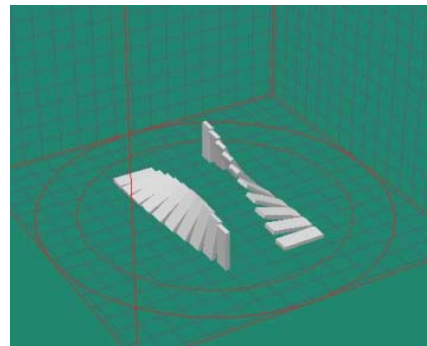


Abbildung 6-11: Anordnung der Testkörper im DTM2000-Bauraum

Den Einfluss der Outline-Belichtungsanzahl zeigen die Diagramme in Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13. Tendenziell ist eine Reduzierung der Rautiefe R_z durch den Einsatz vom Outlinelaser um minimal 11,6 μm (6,88 %) bei 10° und maximal 35,25 μm (28,41 %) bei 80° für die Sinterstation® DTM 2000-855 und um minimal 15,64 μm (14,64 %) bei 40° und maximal 37,56 μm (22,18 %) bei 10° für die Sinterstation® DTM 2500 zu beobachten. Nach jeder Schichtgenerierung fährt der Outlinelaser die Randkonturen jeder Schicht ab und glättet damit die seitlichen Oberflächen des Bauteils durch versintern von zusätzlichem Pulvermaterial. Der Outlinelaser hat fast die gleiche Streckenenergie wie die von dem Füllaser:

$$E_{s,Outline} = P_O / v_O = 1,5 / 279,4 = 0,0054 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$\approx E_{s,Fill} = P_f / v_s = 7 / 1257,3 = 0,0056 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

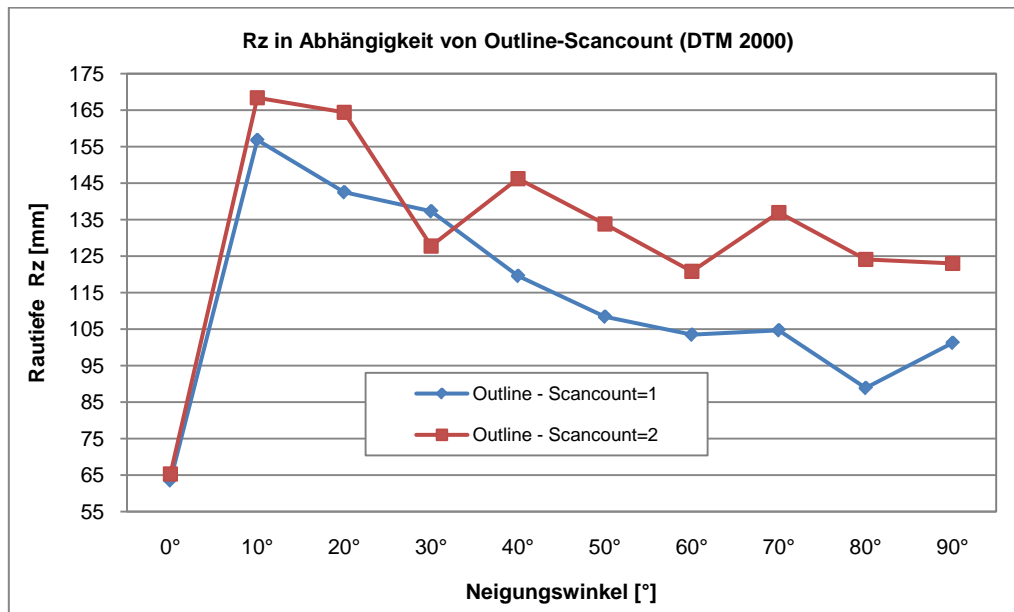


Abbildung 6-12: Rautiefe in Abhängigkeit von Outline-Scancount Bei DTM 2000-855

Der Erfolg dieser Funktion hängt jedoch weitestgehend von der Einstellung der restlichen Bauprozessparameter ab, wie z.B. der Scangeschwindigkeit, der Schichtdicke und des Linienabstandes, Vorwärmtemperatur, Laserleistung, Pulverzustand usw.. Wenn irgendein Parameter geändert wird, sollen danach auch die Offsetfaktoren (die Outline- sowie Filllaser-Kompensationsfaktoren) erneut errechnet werden. Bei unkorrekter Einstellung der Offsetfaktoren wird der Outlinelaser auch die falsche Kontur abfahren, sodass er Bereiche entweder innerhalb oder außerhalb der Sollkonturen belichtet und das Ergebnis in beiden Fällen schlechte Oberflächenqualität und schlechte Maßhaltigkeit ist.

Eine doppelte Belichtung mit dem Outlinie-Laser oder eine Änderung der Einsatzreihenfolge bringen keine zusätzliche Verbesserung mit sich, wie Abbildung 6-13 zeigt.

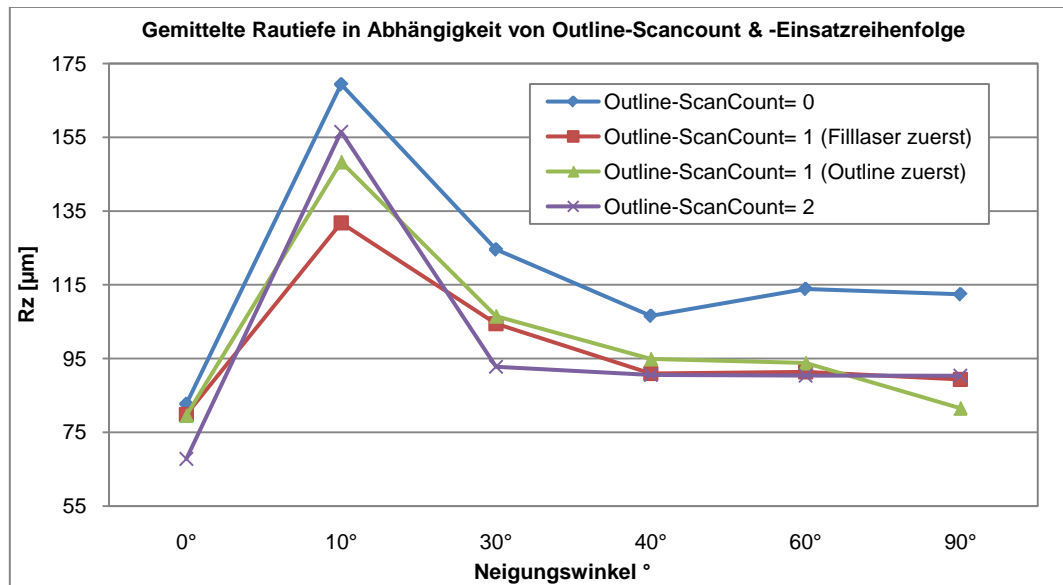


Abbildung 6-13: Rautiefe in Abhängigkeit von Outline-ScanCount & -Einsatzreihenfolge Bei DTM 2500

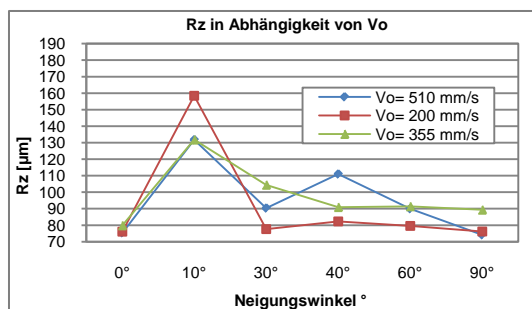


Abbildung 6-14: R_z in Abhängigkeit von Outline-Scangeschwindigkeit V_o bei DTM 2500

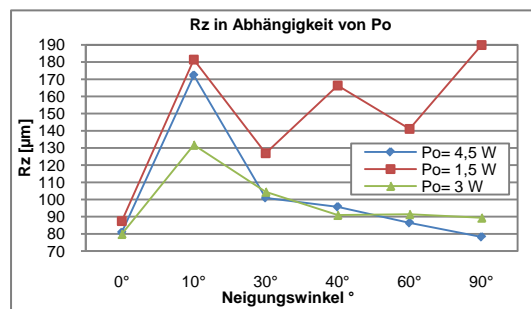


Abbildung 6-15: R_z in Abhängigkeit von Outline-Laserleistung P_o bei DTM 2500

Dabei schneidet die Outline-Laserleistung weniger positiv ab. Wenn die Laserleistung des Outline um 50 % reduziert wurde, stieg die Oberflächenrauheit annähernd proportional zu dem Neigungswinkel. Aber eine Verdopplung seiner Laserleistung wird die Oberflächenrauheit nicht weiter verringern(vgl. Abbildung 6-15). Des Weiteren hat eine Verdopplung bzw. Reduzierung der Scangeschwindigkeit des Outline-Lasers keine eindeutige Wirkung auf die Oberflächenrauheit(vgl. Abbildung 6-14).

6.2.2 Wirkung der Schichtdicke auf die Oberflächenrauheit

Die Schichtdicke ist eine der entscheidenden Einflussgrößen bei allen generativen Fertigungsverfahren. Es ist wohl bekannt, dass eine größere Schichtdicke zu einem schnelleren Baufortschritt führt, wird jedoch zu Lasten der mechanischen und optischen Eigenschaften der hergestellten Bauteile geht. Zu wissen, wo genau die Ober- und Untergrenze zur Beschleunigung des Bauprozesses durch die Erhöhung der

Schichtdicke, in Hinsicht auf die Oberflächenrauheit liegt, ist das Ziel dieser Versuchsreihe.

Die Testkörper werden hier auch aus derselben Pulvermischung in mehreren Bauprozessen übereinander und unter unterschiedlichen Neigungswinkel gebaut (vgl. Abbildung 6-16). Nach den in der Norm DIN EN ISO 4288 [53] enthaltenen Messbedingungen wird die Rautiefe hier in die Baurichtung, in der sich der größte Rauheitswert ergibt, senkrecht auf die Schichtränder gemessen (vgl. Abbildung 6-17).

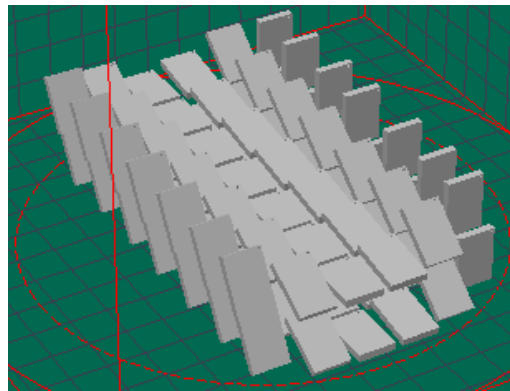


Abbildung 6-16: Anordnung der Bauteile im Bauraum von DTM 2000

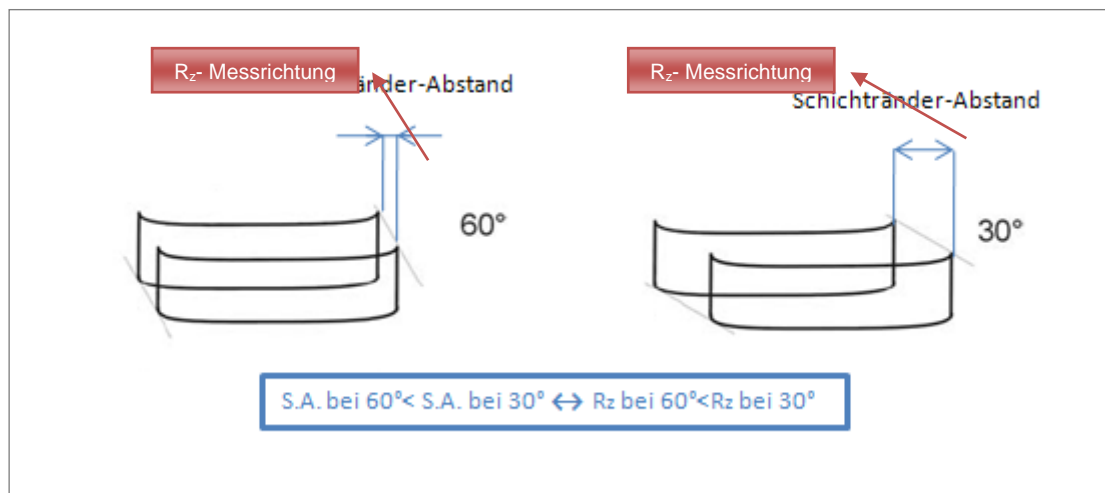


Abbildung 6-17: Schichtränder-Abstand in Abhängigkeit vom Neigungswinkel

Im Kapitel 5.10 wurde nachgewiesen, dass in Bezug auf mechanischen Eigenschaften die Obergrenze für die Erhöhung der Schichtdicke bei 0,14 – 0,15 mm liegt, falls die Festigkeit konstant gehalten werden soll. Dann sinkt die Festigkeit mit der weiteren Erhöhung der Schichtdicke wegen der Materialzersetzung an der Schichtoberfläche ab (vgl. Abbildung 5-40).

Wie das Diagramm in Abbildung 6-18 zeigt, gilt fast das gleiche für die optischen Eigenschaften. Wenn die Schichtdicke von 0,1 mm auf 0,15 mm erhöht wird, steigt die Rauheit um weniger als 6,5 % mit Ausnahme von dem Winkelbereich 10°- 30° da hier die Rauheit um bis 70 % bei 10° steigt. Denn je kleiner der Neigungswinkel ist, desto größer wird der Abstand zwischen den übereinanderlappenden Schichträndern bzw. desto größer wird die Rautiefe (vgl. Abbildung 6-17). Aber wenn die Schichtdicke von 0,1 mm auf 0,2 mm erhöht wird, steigt die Rauheit um 50 % - 100 % für alle Neigungswinkel zwischen 10° und 80°.

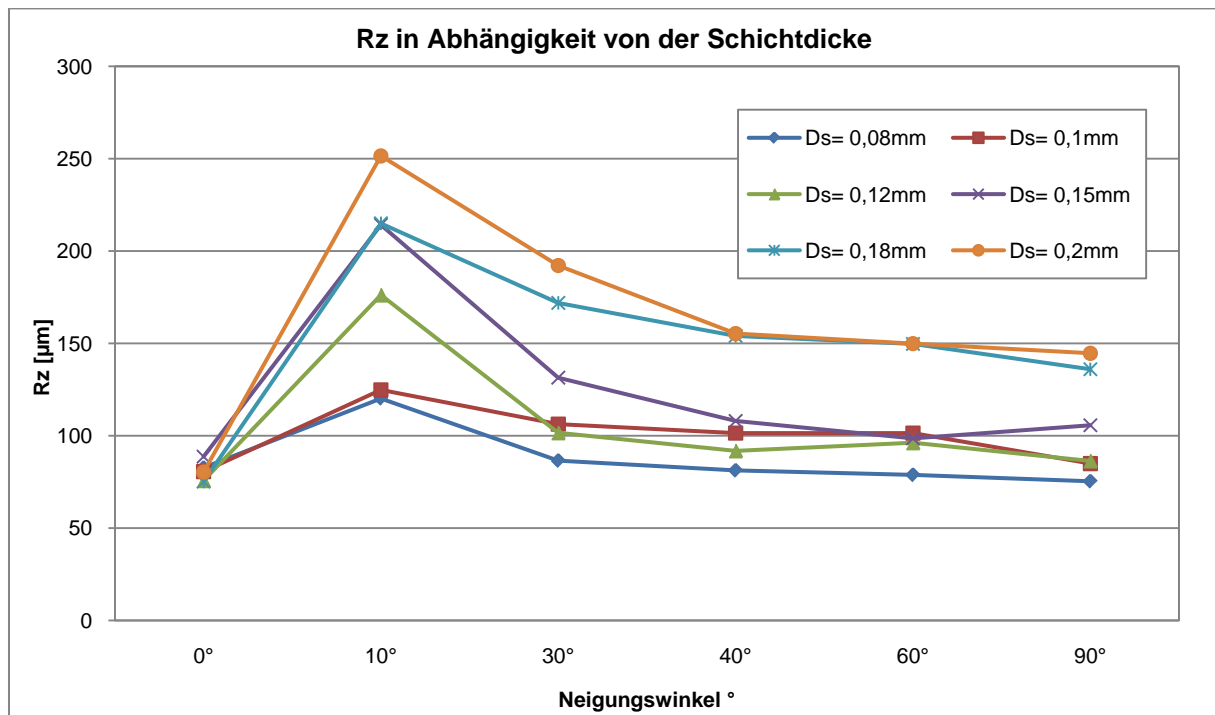


Abbildung 6-18: Die Rautiefe in Abhängigkeit von der Schichtdicke

7 Die Nachbearbeitungsmöglichkeit beim LS von Thermoplasten

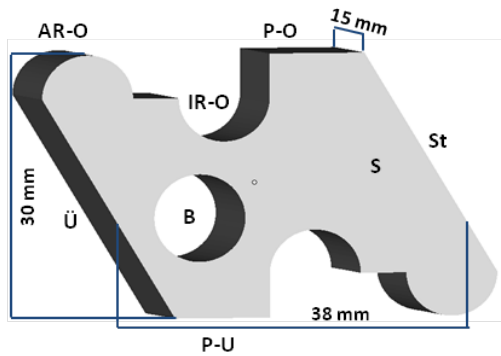
In diesem Kapitel wird anhand experimenteller Versuche ausführlich analysiert, inwieweit die Oberflächenqualität der lasergesinterten PA-Bauteile durch gezielte Nachbearbeitung mit Verfahren der Oberflächentechnik, verbessert werden kann. In der Analyse werden die Nachbearbeitungsverfahren Strahlen, Fräsen, Gleitschleifen, Infiltrieren, Lackieren und Metallisieren betrachtet. Dazu wird zunächst jeweils eine Charakterisierung der Wirkprinzipien der Verfahren vorgenommen und die Ausführung der experimentellen Bearbeitung dargestellt. Zudem erfolgt ein Abwägen der Verfahrensvor- und Verfahrensnachteile, auf dessen Basis eine Einschätzung zur Eignung des Verfahrens in Bezug auf die qualitative Verbesserung der Oberflächentopografie vorgenommen wird. Schließlich folgt eine Empfehlung für die Anwendung und Kombination der Erfolg versprechenden Nachbearbeitungsverfahren.

7.1 Ausgangssituation:

Der folgenden Analyse liegen LS Prüfkörper aus PA 12 zugrunde, deren Fertigung unter Verwendung gleicher Bauparameter erfolgt ist. Die Pulverkörnung variiert zwischen den Bauprozessen, wodurch es der Bestimmung durchschnittlicher Ausgangswerte für die Oberflächenqualität bedarf. Zudem unterscheidet sich die Oberflächenqualität an den einzelnen Prüfflächen aufgrund der jeweiligen Lage im Bauraum. Die Klärung der Ausgangslage bildet somit die Basis zur Beurteilung der Nachbearbeitungsergebnisse.

7.1.1 Prüfkörper und Prüfflächen

Die Geometrie des Prüfkörpers ist durch zwei, im Abstand von 38 mm verlaufende, parallele Ebenen mit 60° Neigungswinkel zur Bauebene, sowie durch 30mm Höhe und 15mm Breite gegeben. Ober- und Unterseite des Prüfkörpers ergeben sich aus der Lage des Bauteils während des Bauprozesses, wobei die Standfläche der Bauteilunterseite entspricht (vgl. Abbildung 7-1). Dort befinden sich je eine Planfläche (P), sowie eine Innenrundung (IR) und eine nach außen weisende Rundung (AR). Der Rundungsdurchmesser beträgt 10 mm. Zudem ist eine Durchgangsbohrung von 10 mm Durchmesser über der unteren Planfläche in den Prüfkörper eingelassen. Anhand des symmetrischen Aufbaus ist es möglich, die Wirkung der Nachbearbeitungsverfahren an gleichen Geometrien unterschiedlicher Orientierung zu untersuchen. Dazu werden insgesamt acht Prüfflächen ausgewertet.



Nr.	Zeichen	Prüffläche
1	St	Steigung
2	Ü	Überhang
3	P-O	Planfläche (oben)
4	IR-O	Innenrundung (oben)
5	AR-O	Außenrundung (oben)
6	P-U	Planfläche (unten)
7	S	Seite
8	B	Bohrung

Abbildung 7-1: Prüfkörper und Prüfflächen

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 7-1 den Aufbau des Prüfkörpers sowie die Lage der Prüfflächen. Steigung und Überhang entsprechen den Bezeichnungen St und Ü. Die Flächen P-O, IR-O und AR-O kennzeichnen die Planfläche sowie Innen- und Außenrundung an der Oberseite. Zudem werden die untere Planfläche (P-U), die Seitenfläche (S) und die Bohrung (B) analysiert.

7.1.2 Untersuchung der Ausgangssituation:

Die unnachbearbeiteten Prüfkörper weisen im Ausgangszustand teilweise extrem hohe Rauheitskennwerte und zudem diverse, fertigungsbedingte Abweichungen an den Prüfflächen auf. Insbesondere ist bei makroskopischer Betrachtung an St, IR-O und AR-O eine stark poröse Oberflächentopografie erkennbar. Zur Bestimmung der Ausgangskennwerte der betrachteten Prüfflächen wurden insgesamt 8 beliebige Prüfkörper aus 4 verschiedenen Bauprozessen bewertet. Die Messung wurde für jede Prüffläche an drei Stellen durchgeführt. Die quantitative Erfassung der Ausgangskennwerte wird in Tabelle 7-1 vorgenommen. R_a und R_z entsprechen dem arithmetischen Mittelwert und R_{max} dem Maximum der zugrunde liegenden Messwerte aus den vier Bauprozessen.

Fläche	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{max} [μm]	Streuung R_a [μm]	Streuung R_z [μm]
St	22,32	112,06	174,58	3,42	16,94
Ü	13,31	66,98	101,21	3,00	10,33
P-O	12,04	60,83	92,14	1,86	9,27
IR-O	15,99	79,60	196,40	4,98	22,51
AR-O	18,02	89,59	175,44	6,08	25,98
P-U	7,81	41,39	81,72	2,64	16,97
S	15,99	81,75	130,85	2,27	11,19
B	18,58	92,01	170,57	6,85	31,51

Tabelle 7-1: Rauheitskennwerte der Ausgangssituation

Es ist festzustellen, dass jene Prüfflächen, die während des Bauprozesses nach unten orientiert waren (Ü, P-U), deutlich niedrigere Rauheitskennwerte aufweisen, als die Symmetriepartner an der Oberseite (St, P-O). Gleiches gilt für Rundungen. An

Rundungen und Schrägflächen treten Stufeneffekte auf, die die Tendenz der Schichtränder zu einer Wölbung nach oben, fördern. An St, IR-O und AR-O entstehen auf diese Weise nach oben orientierte Zacken im Mikrometer-Bereich, aus denen die porös erscheinende Oberfläche entsteht und höhere Rauheitskennwerte resultieren. Sind die Schrägflächen und Rundungen hingegen während des Bauprozesses nach unten orientiert, wie z.B. der Überhang Ü, so resultiert aus demselben Effekt eine gleichmäßigere Oberflächentopografie, da die Schichttränder sich aufgrund der Wölbung an die darüberliegende Schicht annähern und den Stufeneffekt teilweise kompensieren. Planflächen sind, aufgrund ihrer vollständigen Einbettung in die Bauebene, nicht durch Stufeneffekte geprägt und hängen in Bezug auf die Oberflächenqualität nur von der Pulverkörnung ab. Sie erscheinen weitaus homogener. Die Einbeziehung der nicht vertiefend betrachteten Innen- und Außenrundung an der Unterseite (Kennwerte: IR-U: $R_a = 8,21 \mu\text{m}$; $R_z = 43,94 \mu\text{m}$; $R_{\text{max}} = 82,71 \mu\text{m}$ / AR-U: $R_a = 9,68 \mu\text{m}$; $R_z = 45,97 \mu\text{m}$; $R_{\text{max}} = 91,79 \mu\text{m}$) zeigt, dass aus der höheren Oberflächenqualität auf Grund der Prüfflächenlage an der Bauteilunterseite eine Steigerung der Homogenität der Oberflächentopografie resultiert, die die Abhängigkeit der Messwertgröße von der Prüfflächengeometrie senkt.

Insgesamt weisen Rundungen mit Lage an Ober- oder Unterseite des Prüfkörpers höhere Kennwerte als Planflächen mit identischer Lage auf. Die höchste Rauheit ergibt sich jedoch an Schrägflächen. So wurden die höchsten Kennwerte an St und die niedrigsten an P-U ermittelt (vgl. Tabelle 7-1). Für die Nachbearbeitung liegt im Grunde nicht eine Ausgangssituation vor, die alle Flächen hinreichend charakterisiert, sondern vielmehr eine Vielzahl flächenspezifischer Ausgangssituationen.

Die Notwendigkeit, LS-Bauteile nachzubearbeiten, ergibt sich jedoch nicht nur aus den hohen Rauheitskennwerten und der nach Geometrie und räumlicher Lage variierenden Größenordnung dieser Werte, sondern ebenso aus der enormen Streuung der Messwerte an allen Prüfflächen. Alarmierend ist, dass diese Unterschiede nicht ausschließlich auf verschiedenen Bauprozessen beruhen, sondern insbesondere bei der Betrachtung mehrerer Messstrecken ein und derselben Prüffläche auftreten. Zur Sicherung der Oberflächenqualität und somit des Produktionsergebnisses ist eine Nachbearbeitung unbedingt erforderlich.

7.2 Verfahren der Oberflächentechnik

Die Oberflächentechnik nutzt einen Großteil der gemäß DIN 8580 eingeteilten Fertigungsverfahren zur Erzielung spezifischer Oberflächeneffekte. Anders als im Bereich der Fertigungstechnik basiert die Einteilung dieser Verfahren nicht auf einer Zunahme, Beibehaltung oder Verminderung des Zusammenhalts [54], sondern erfolgt zweckmäßig in die Bereiche der Oberflächenbehandlung und der Oberflächenbeschichtung.

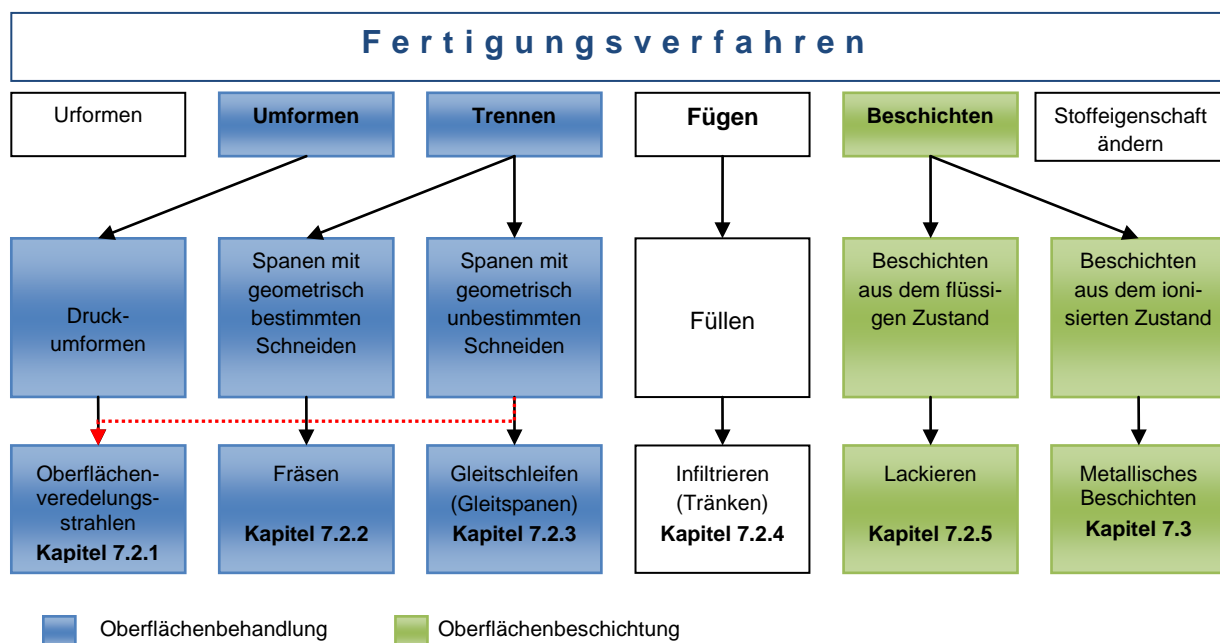


Abbildung 7-2: Systematisierung der betrachteten Nachbearbeitungsverfahren

Die Oberflächenbehandlung umfasst weite Teile der gemäß DIN 8580 eingeteilten Hauptgruppen „Umformen“, „Trennen“ sowie „Stoffeigenschaft ändern“ und wird weiterführend in die Gruppen „mechanische Verfahren“, „Thermische Verfahren“ und „Thermochemische Verfahren“ unterteilt^{[14][55]}. Das Oberflächenbeschichten umfasst die Hauptgruppe „Beschichten“ und kann je nach Bedarf hinsichtlich der Ausgangsform des Beschichtungsstoffes (fest, flüssig, gasförmig, ionisiert) oder nach der Art der entstehenden Überzüge (metallisch, nichtmetallisch) unterteilt werden^{[40][56]}. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verbesserungspotenzial der Verfahren Oberflächenveredelungsstrahlen (im Folgenden Strahlen), Fräsen, Gleitschleifen, Infiltrieren, Lackieren in Bezug auf die Oberflächenqualität untersucht. Dabei sind das Oberflächenstrahlen, das Fräsen sowie das Gleitschleifen den mechanischen Verfahren der Oberflächenbehandlung zuzuordnen und das Lackieren sowie das Metallisieren der Oberflächenbeschichtung.

Da die Verfahrensgruppe „Tränken“ primär auf Veränderungen unterhalb der Werkstückoberfläche, also im Bauteilinneren, abzielt, kann das Infiltrieren nicht eindeutig einem Bereich der Oberflächentechnik zugeordnet werden. Abbildung 7-2 veranschaulicht die vorgenommene Systematisierung der betrachteten Verfahren unter Berücksichtigung des Ordnungssystems gem. DIN 8580 sowie der gängigen Einteilung in der Oberflächentechnik.

7.2.1 Strahlen

Strahlen ist ein Verfahren, bei dem körnige Materialien (Strahlmittel) in Strahlanlagen beschleunigt und zum Aufprall auf Oberflächen gelenkt werden. Dabei entsteht Abtrag an der Werkstückoberfläche. Strahlen kann sowohl zum Entgraten als auch zur Oberflächenverbesserung und somit zur Vorbereitung weiterführender Behandlungen eingesetzt werden. Die ganzheitliche Betrachtung des Strahlens ist in DIN 8200 gegeben. Der betrachtete Anwendungsbereich des Glättstrahlens ist, zusammen mit dem Polier-, Rau- und Mattierstrahlen, der Untergruppe „Oberflächenveredelungsstrahlen“ zugeordnet.^[54] In Bezug auf die Oberflächenqualität hängt das erreichbare Strahlergebnis vorwiegend von der Strahlmittelsorte, der Strahlguthärte, der Strahlmittel-Auftreffgeschwindigkeit, dem Strahlabstand, dem Strahlauftrittswinkel, dem Strahlbedeckungsgrad sowie der Strahleinwirkdauer ab^[57]. Weitere Einflüsse resultieren aus der Strahlgutgeometrie und dem Rauheitsprofil des Strahlgutes vor der Bearbeitung. Abbildung 7-3 zeigt eine mögliche Systematisierung der Einflussgrößen^[58].

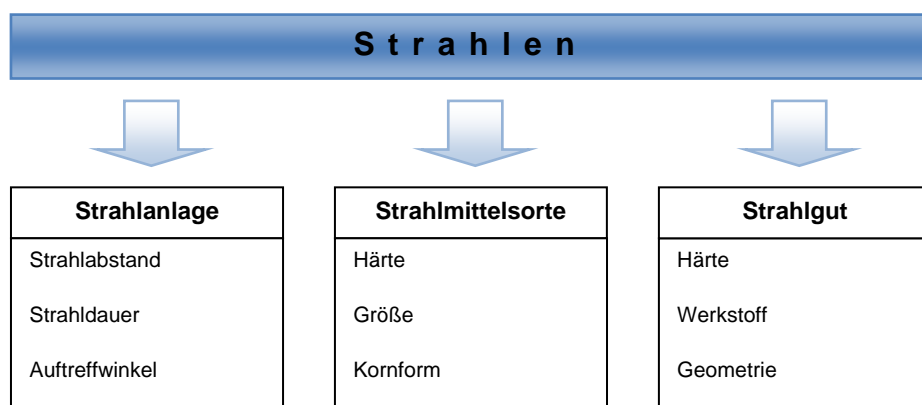


Abbildung 7-3: Einflussgrößen auf das Strahlergebnis [59]

Als besonders relevant für das Strahlergebnis gilt die Korngröße des verwendeten Strahlmittels (vgl. Abbildung 7-4). So ergibt sich bei Verwendung zu kleiner Körner (Bsp. 1) nur eine geringe Wirkung, da das Korn vorwiegend in die Vertiefungen der Oberfläche trifft. Bei zu großem Korn verringert sich ggf. die Oberflächenqualität (Bsp. 2)^[56].

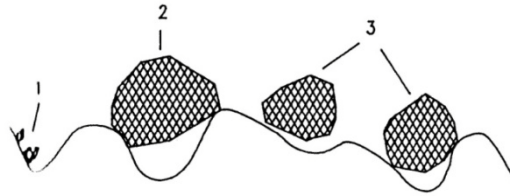


Abbildung 7-4: Wirkung von Strahlkörnern auf Oberflächen [56]

Geringere Bedeutung kommt hingegen der Strahlmittkornform und –härte zu, für die Bohnet unter Verwendung verschiedener Strahlmittel bei gleichen Bearbeitungsbedingungen (Druck: 4,5 bar, Strahlabstand: 30 bis 40 mm), keinen eindeutigen Zusammenhang mit dem Strahlergebnis feststellen konnte^[59].

7.2.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die experimentelle Nachbearbeitung mittels Strahlen wird bei allen Prüfkörpern (insgesamt 21 Prüfkörper) mit Strahlmittel aus Glaskörnern auf einer Druckluftanlage durchgeführt. Die Düse ist mit Strahlrichtung nach unten mittig in der Strahlkabine montiert. Da die Bauteile bei der Bearbeitung aller Prüfflächen beweglich bleiben müssen, kann keine Fixierung zur Sicherung des Strahlabstandes vorgenommen werden. Der Abstand muss grob auf 40mm bis 50mm geschätzt werden. Die Bearbeitung erfolgt an den Prüfflächen St, Ü und S entgegen den Schichträndern und an den Flächen P-O, IR-O, AR-O, P-U und B entlang der Schichtränder. Die Prüfflächen werden in Linien mit dem Strahl abgefahren. Das Strahlmittel trifft in einem Winkel von ca. 25° bis 30° auf die Prüfkörperoberfläche. Untersucht wird die Auswirkung des Luftdrucks im Bereich von 1 bar bis 7 bar auf die Oberflächenqualität der verschiedenen Prüfflächen.

7.2.1.2 Auswertung und Diskussion

Die Nachbearbeitung der Prüfkörper mittels Strahlen bewirkt eine Veränderung der Oberflächenqualität, die sowohl in Abhängigkeit von der Prüffläche, als auch mit dem jeweils verwendeten Strahldruck variiert. Bei geringem bis mittlerem Strahldruck (1 bar bis 3 bar) ist zunächst ein Anstieg der Kennwerte R_a und R_z zu erkennen. Bei Bearbeitung mit höherem Druck folgt ein Absinken dieser Kennwerte und somit eine Steigerung der Oberflächenqualität. Abbildung 7-5 zeigt eine Übersicht des Bearbeitungsergebnisses durch Strahlen. Der Grund für dieses Absinken der Oberflächenqualität liegt in der Entfernung von Pulverresten, die den Prüfkörpern aufgrund des Sinterprozesses anhaften. Der Strahldruck (1 bar bis 3 bar) ist groß genug um Pulverpartikel, die sich zwischen den Schichträndern des Bauteils und in oberflächlichen

Poren festgesetzt haben, zu lösen. Der erzeugte Abtrag am Bauteil ist jedoch so geringfügig, dass er in der Regel von der Aufrauung der Prüfflächen überdeckt wird. Das Ausmaß der anfänglichen Verschlechterung hängt somit essentiell davon ab, wie gut sich während des Bauprozesses loses Pulver an den Prüfflächen anlagern kann. Besonders ausgeprägt ist die Verschlechterung der Oberflächenqualität an Prüffläche St im Strahldruckbereich bis 3 bar. Sie liegt darin begründet, dass durch den Stufeneffekt, der nach oben gewölbte Schichtränder erzeugt, Risse und Spalten in der Oberflächenstruktur entstehen. Diese begünstigen das Anlagern von Pulverresten.

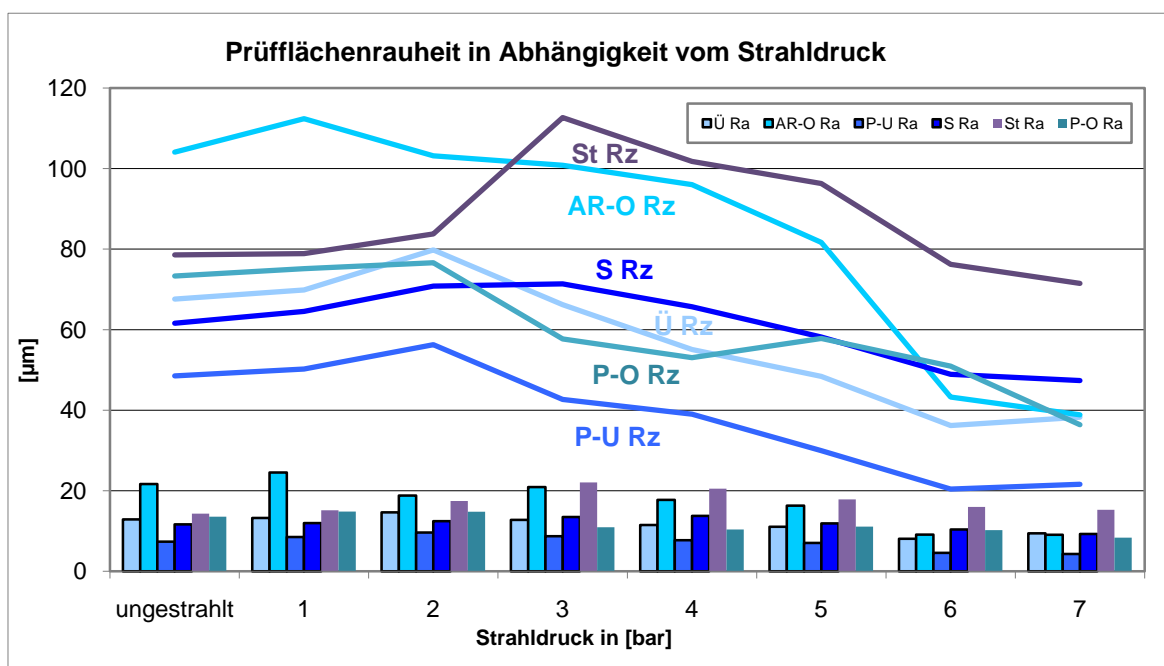


Abbildung 7-5: Bearbeitungsergebnis beim Glasstrahlen

Mögliche Ursache für das positiv korrelierende Verhalten könnte jedoch eine gleichmäßige Oberflächenstruktur aufgrund der Lage im Bauraum (vgl. P-U und Ü) sein. Im Vergleich weist P-O eine porösere Oberfläche auf. An S könnte die weniger starke Prägung der Fläche durch Stufeneffekte ausschlaggebend sein. Eine ungleichmäßige Verbesserung könnte bspw. aus hoher Porosität oder starken Stufeneffekten (vgl. Prüffläche St) resultieren.

Insgesamt eignet sich das Strahlen sehr gut, um Bauteile von anhaftenden Pulverresten zu reinigen und auf diese Weise für nachfolgende Nachbearbeitungsverfahren vorzubereiten (Reinigungsstrahlen). Weniger sinnvoll und nahezu unmöglich ist hingegen das Erzielen einer hohen Oberflächenqualität durch das Strahlen. Zum einen

liefert die Bearbeitung für die verschiedenen Prüfflächen stark unterschiedliche Resultate und zum anderen konnte an sämtlichen Prüfflächen lediglich eine mäßige Steigerung der Oberflächenqualität erzielt werden.

7.2.2 Fräsen

7.2.2.1 Verfahren

Beim Fräsen handelt es sich um ein Verfahren, das durch die Vorschubbewegung eines rotierenden, kreisförmigen Werkzeugs über einem Werkstück einen Span an der Werkstückoberfläche abhebt. Dabei sind gem. DIN 8589-3 das Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formfräsen zu unterscheiden, die unter Verwendung verschiedener Ordnungsgesichtspunkte weiter unterteilt werden können. Durch entsprechende NC-Programmierung können komplexe Oberflächenformen gefräst werden^{[60][61]}.

Sonderverfahren stellen das Hochgeschwindigkeitsfräsen HSC, sowie das Feinfräsen dar. Beim HSC-Fräsen wird mit einem Vielfachen der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit von konventionellen Fräsverfahren gearbeitet. Durch die geringeren Schneidkräfte kann unter anderem die erreichbare Oberflächenqualität gesteigert werden. Das Feinfräsen hingegen wird nicht zur Formgebung, sondern zur Nachbearbeitung von bestehenden Flächen verwendet.

In Bezug auf die erreichbare Oberflächenqualität wird das Ergebnis der Fräsbearbeitung vor allem durch das verwendete Werkzeug beeinflusst. So sind nach Pauksch vor allem die Eckenform der Werkzeugschneiden, der Axialschlag, die Ausrichtung der Nebenschneiden sowie statische und dynamische Verformungen des Bearbeitungssystems entscheidend für die Herstellung glatter Oberflächen. Der Fräser bewirkt in Abhängigkeit von der Eckenform und dem Axialschlag Bearbeitungsspuren, deren Tiefe den größten Teil der Rauheit bestimmt. Aufgrund der Eckenform erzeugt das Werkzeug ein spezifisches, regelmäßiges Profil mit Rillen der Tiefe e . Diese addieren sich mit der Größe a des Axialschlags zu der theoretischen Rautiefe R ($R = e + a$)^[62].

7.2.2.2 Auswertung und Diskussion

Die Nachbearbeitung mittels Fräsen erfolgte an Prüffläche S mit einem Schlichtfräser durch die Firma MSB. Die Bearbeitung erfolgte bei hoher Drehzahl (30000 min^{-1}) des Werkzeugs und geringem Vorschub (5 m/min).

Durch die Bearbeitung konnte auf diese Weise eine Verbesserung der Oberflächentopografie erzielt werden, die eine Reduzierung der Rauheitskennwerte um maximal 93,4 % (gemessen bei R_a) bei Schnitttiefe $a_p = 0,3$ mm bewirkt. Die erreichten Absolutwerte betragen nach der Bearbeitung für R_a 5,61 μm , für R_z 41,05 μm und für R_{max} 60,08 μm bei $a_p = 0,1$ mm bzw. 1,06 μm für R_a , für R_z 6,08 μm und für R_{max} 9,2 μm bei $a_p = 0,3$ mm. Zur Veranschaulichung ist das Bearbeitungsergebnis in Abbildung 7-6 dargestellt.

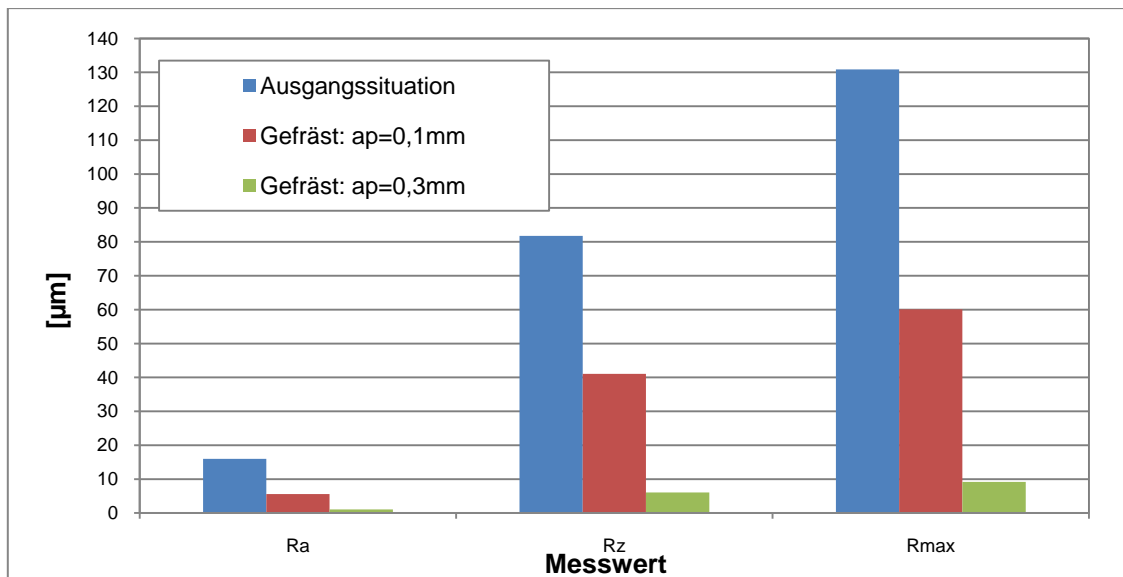


Abbildung 7-6: Bearbeitungsergebnis Fräsen

Ebenso konnte die Streuung der Kennwerte an Prüffläche S für R_a von 2,27 μm auf 0,08 μm und für R_z von 11,19 μm auf 0,9 μm verringert werden. Im Bearbeitungsergebnis ist die Prüffläche somit deutlich gleichmäßiger beschaffen.

Bei Betrachtung des aufgezeichneten Oberflächenprofils für die nachbearbeitete Prüffläche (bei $a_p = 0,1$ mm) fällt im Vergleich mit dem Oberflächenprofil aus der Ausgangssituation auf, dass aus der Bearbeitung deutlich geringere Schwankungen des Profilverlaufs resultieren. Aus der Wölbungstendenz der Schichtränder ergibt sich, dass die Schichtränder in der Ausgangssituation nicht miteinander verschmelzen und eine unregelmäßige Oberfläche entsteht. Die spitzen Schichtränder konnten durch die Bearbeitung abgetragen werden. Die restliche bestehende Rauheit im Bearbeitungsergebnis ergibt sich maßgeblich aus tiefen Tälern und Spalten, die ins Bauteilinnere reichen. Der Ausgleich dieser Abweichungen erfordert noch einen Materialabtrag von bis zu 70 μm . Die kleinen nach außen orientierten Rauheitsspitzen resultieren aus der mechanischen Bearbeitung. (vgl. Abbildung 7-7). Also die nachzubearbei-

tenden LS-Teile sollen insgesamt mindestens bis auf ein Aufmaß von 0,2 - 0,3 mm abgefräst werden, um gute Ergebnisse zu erreichen(vgl. Abbildung 7-6).

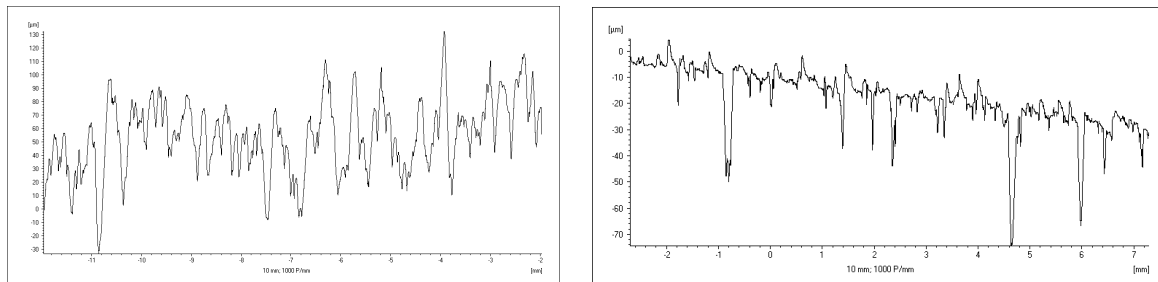


Abbildung 7-7: Oberflächenprofil Fläche S vor (links) und nach (rechts) der Bearbeitung (bei $a_p = 0,1\text{mm}$)

Ein primär nicht untersuchter Effekt ergibt sich durch die Verringerung der Welligkeit, die sich im Absinken der Wellentiefe um ca. 71,77 % von 42,51 µm in der Ausgangssituation auf 12 µm im Bearbeitungsergebnis bei $a_p = 0,3\text{ mm}$ widerspiegelt.

Durch Fräsen kann somit insgesamt ein sehr gutes Nachbearbeitungsergebnis erzielt werden. Zu beachten ist, dass der für die Anwendung zu betreibende Aufwand schnell mit der Komplexität der Werkstückgeometrie ansteigt. Zwar ist es möglich die Nachbearbeitung auf Basis von STL Dateien effizient durchzuführen, jedoch steht der durch die Bearbeitung erreichbare Nutzen in keinem Verhältnis zu den Anschaffungskosten. Sofern eine Fräsanlage einzig für den Nachbearbeitungsprozess beschafft werden muss, stellt das Fräsen somit keine lohnenswerte Methode der Nachbearbeitung dar. Dazu soll erwähnt werden, dass Teile mit dünnen Wänden oder mit feinen komplizierten Strukturen mit diesem Verfahren nicht nachbearbeitet werden können.

7.2.3 Gleitschleifen

Gleitschleifen ist ein spanendes Verfahren, bei dem der Abtrag am Werkstück durch lose Schleifkörper, die mit Schleifkörnern versetzt sind, entsteht. Schleifkörper und Werkstücke werden dazu in einen gemeinsamen Arbeitsbehälter gegeben und in eine undefinierte Relativbewegung zueinander versetzt. Die Bearbeitung erfolgt unter kontinuierlicher Wasserzugabe, wobei das Prozesswasser mit chemischen Behandlungsmitteln (Compounds) zur Erzielung verschiedener Wirkungen (z. B. Binden und Abtragen des Abriebs, Korrosionsschutz) angereichert werden kann [63]. Gem. DIN 8589-17 ist das Gleitschleifen der Verfahrensgruppe „Gleitspanen“ aus der in DIN 8580 beschriebenen Hauptgruppe „Trennen“ zuzuordnen [64]. Eine weitere Unterteilung des Verfahrens erfolgt bezüglich der Relativbewegungserzeugung in die Varian-

ten Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft- und Tauch-Gleitschleifen, welche sich stark in der Effektivität der Bearbeitung, als der Schleifleistung, variieren.

Gleitschleifanlagen sind durch zahlreiche Variationsmöglichkeiten der Schleifkörper und Compounds sowie aufgrund kurzer Umrüstzeiten flexibel in der industriellen Fertigung einsetzbar. Gleitschleifanlagen können als eigenständige Stationen betrieben oder als Durchlaufanlagen in Produktionsstraßen integriert werden^{[63][65][66]}. Das Bearbeitungsergebnis in Bezug auf die Oberflächenqualität wird im Wesentlichen durch viele Faktoren beeinflusst. Diese Faktoren lassen sich den Bereichen Anlage, Verfahrensmittel und Werkstück (vgl. Abbildung 7-8) zuordnen.



Abbildung 7-8: Einflussgrößen auf das Schleifergebnis

7.2.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Nachbearbeitung durch Gleitschleifen wird im Rahmen dieser Arbeit eine Tellerfliehkraftanlage vom Typ CF der Firma OTEC Präzisionsfinish GmbH verwendet. Diese erzeugt die nötige Relativbewegung mittels eines rotierenden, tellerförmigen Bodens, der durch einen Spalt von der Wand des zylindrischen Arbeitsbehälters getrennt ist. Über den Spalt wird kontinuierlich Wasser in den Arbeitsbehälter eingebracht. Die aus der Rotation entstehenden Fliehkräfte drücken das Gemisch aus Schleifkörpern und Werkstücken an die Behälterwand, was eine toroidale Bewegung erzeugt ^{[58] [63]}. Durch eine lamellenartige Struktur der Behälterwand, wird das Arbeitsgemisch während der Bearbeitung gleichmäßig umgewälzt ^{[67] [68]}. Ausgehend von großen Differenzen in der Oberflächenqualität zwischen den einzelnen Prüfflächen, erfolgt die Nachbearbeitung mit vier Schleifkörpern unterschiedlicher Schleif-

leistung, Bindungsart und Form. Die Auswahl ist in Tabelle 7-2 zusammenfassend dargestellt.


Name	Form	Bindung	Größe [mm]	Gewicht [mg/mm ³]	Schleifwirkung
P-HSC 10	 Tetraeder	Kunststoff	a=b = 10	9,76	grob
KG 12	 Kegel		a= 12	3,32	fein
KX 12			a= 12	2,84	fein bis polieren
ZSP 4/5	 Schrägzylinder	Keramik	a/b = 4/5	1,19	polieren

Tabelle 7-2: Übersicht Schleifmittel [69] [67]

Die Schleifkörper werden sowohl einzeln getestet als auch in Kombination verwendet. Dazu wird der Arbeitsbehälter zu ca. 20 % mit Schleifkörpern gefüllt. Die Bearbeitung erfolgt in allen Fällen bei 270 Umdrehungen pro Minute¹ und unter Zugabe von ca. 5,0 Litern Wasser pro Stunde. Bei der Betrachtung einer einzelnen Schleifkörperart liegt die Bearbeitungszeit bei einer bis sieben Stunden.

Versuch	Drehzahl	Wasserzulauf	Bearbeitungsschritte		
1	270 U/min	5,0 L/h	1h - 7h mit P-HSC 10		
2	270 U/min	5,0 L/h	1h - 7h mit KG 12		
3	270 U/min	5,0 L/h	1h - 7h mit KX 12		
4	270 U/min	5,0 L/h	1h - 7h mit ZSP 4/5		
5	270 U/min	5,0 L/h	2h mit P-HSC 10	1h - 4h mit ZSP 4/5	
6	270 U/min	5,0 L/h	2h mit P-HSC 10	2h mit KG 12	1h - 2h mit ZSP 4/5
7	270 U/min	5,0 L/h	2h mit P-HSC 10	2h mit KX 12	1h - 2h mit ZSP 4/5

Tabelle 7-3: Übersicht Gleitschleifversuche

Die Kombination der Schleifkörper wird durch aufeinanderfolgende Einzelbearbeitungen realisiert. Tabelle 7-3 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Gleitschleifversuche.

7.2.3.2 Auswertung und Diskussion

Die Bearbeitung der Prüfkörper mittels Gleitschleifverfahren führt zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität, die maßgeblich von der Geometrie der Prüfflächen und ihrer Lage im Bauraum, der Bearbeitungszeit und den verwendeten Schleifkörpern bzw. der Schleifkörperkombination abhängt. Im Rahmen der Bearbeitung konnte eine Verbesserung von R_a um maximal 89,71 % (AR-O; Versuch 5; 6 Stunden), von R_z um maximal 83,39 % (St; Versuch 2; 7 Stunden) und von R_{max} um 91,88 % (AR-O;

¹ Empfehlung durch die Otec Präzisionfinish GmbH

Versuch 5; 6 Stunden) erzielt werden. In Bezug auf die absoluten Rauheitskenngrößen wurden Minimalwerte von $1,86 \mu\text{m}$ für R_a (AR-O, Versuch 5; 6 Stunden), $8,96 \mu\text{m}$ für R_z (P-U; Versuch 3; 6 Stunden) und $13,87 \mu\text{m}$ für R_{max} (P-U, Versuch 3; 6 Stunden) gemessen. Die statistische Unsicherheit der Messwerte konnte deutlich gesenkt werden. So liegt nach der Bearbeitung die Unsicherheit für R_a bspw. an geraden Flächen deutlich unter $1 \mu\text{m}$ und an Rundflächen unter $4 \mu\text{m}$. Das Bearbeitungsergebnis umfasst somit insgesamt gleichmäßigere Oberflächen mit niedrigeren Rauheitskennwerten.

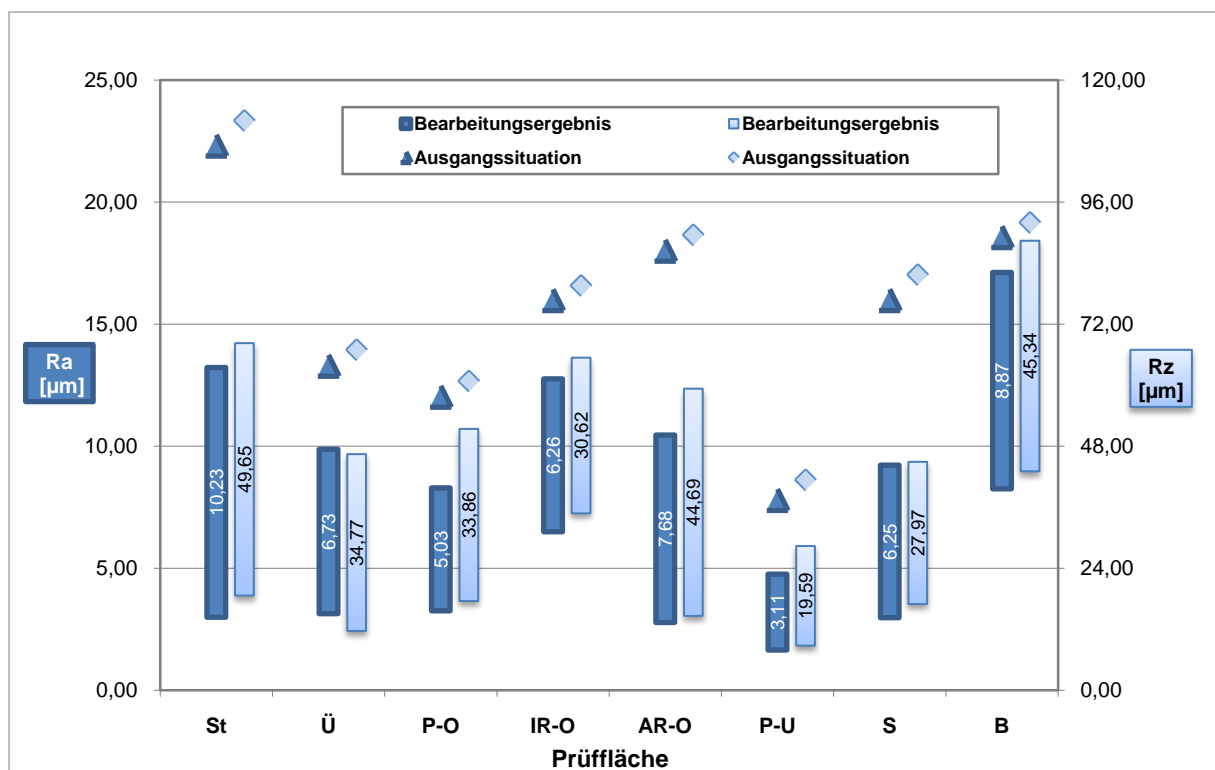


Abbildung 7-9: Bearbeitungsergebnis Gleitschleifen

In Abbildung 7-9 wird dazu die Ausgangssituation für R_a und R_z den Bearbeitungsergebnissen aus den Versuchen 1 bis 4 gegenübergestellt. Die Balken umfassen jeweils den Streubereich zwischen den minimal und maximal gemessenen Kennwerten an den untersuchten Prüfflächen. Zu erkennen ist, dass die maximalen Messwerte nach der Bearbeitung sämtlich einen geringeren Betrag als die Kennwerte in der Ausgangssituation aufweisen.

Das Gleitschleifverfahren hat somit an allen betrachteten Prüfflächen, bei einer Bearbeitungszeit von mindestens einer Stunde, zu einer qualitativen Verbesserung der Oberflächentopografie geführt. Das Ausmaß der Verbesserung variiert in Bezug auf

die jeweiligen Prüfflächen. Zum einen ergeben sich unterschiedliche minimale Messwerte (R_a zwischen 1,65 und 8,25 μm ; R_z zwischen 8,77 und 43,06 μm) und zum anderen unterschiedlich große Streuungsbereiche (R_a zwischen 3,11 und 10,23 μm ; R_z zwischen 19,49 und 49,66 μm).

Das minimal erreichbare Schleifergebnis an der jeweiligen Prüffläche ist dabei maßgeblich von der Schleifkörperzugänglichkeit abhängig, die aus der geometrischen Form und der Lage der Prüffläche resultiert. Zusätzliche Faktoren für die Zugänglichkeit sind durch Form, Größe und Material der Schleifkörper gegeben. In Übereinstimmung dazu weisen die ins Bauteilinnere orientierten Prüfflächen IR-O und B höhere minimal realisierte Messwerte auf. Insbesondere an Prüffläche B bewirkt die, aus der Bohrung (Durchmesser ist 10 mm) resultierende, Unzugänglichkeit der Prüffläche, dass die minimal erreichten Messwerte für R_a bis zu 6,6 μm und für R_z bis zu 34,29 μm über den minimalen Messwerten der übrigen Prüfflächen liegen. Dabei ist entscheidend, dass die verwendeten Schleifkörper (Ausnahme ZSP4/5) nur eine geringfügige Bearbeitung der Bohrung zulassen, da sie entweder zu groß sind (KX 12 und KG 12), oder in der Bohrung verkanten (P HSC 10). Durch ZSP 4/5 erfolgt zwar eine Bearbeitung, jedoch ist die Schleifleistung dieser Schleifkörper deutlich geringer. Weniger problematisch erweist sich die Bearbeitung nach außen orientierter gerader und runder Flächen, deren minimale Messwerte niedriger und relativ dicht beieinander (Intervallgröße R_a : 1,36 μm ; Intervallgröße R_z : 8,62 μm) liegen. Gravierende Unterschiede in Bezug auf die minimalen Werte als Resultat der Flächenform (flach/rund) und der Orientierung (Seite/ Schräge/ Planfläche) konnten nicht festgestellt werden. Zwecks Untersuchung der Flächenabhängigkeit des Bearbeitungsergebnisses wurde der arithmetische Mittelwert der gemessenen Rauheitskennwerte R_a und R_z aus den Versuchen 1 bis 4 für die Prüfflächen St, AR-O, IR-U und P-O gebildet und in Abbildung 7-10 über der Zeit dargestellt.²

Es wird deutlich, dass die unzugänglichere Prüffläche IR-O, abgesehen von der Ausgangssituation, kontinuierlich höhere Messwerte aufweist und somit eine schwächere Bearbeitung angenommen werden kann. Die Prüfflächen AR-O und St hingegen entwickeln sich mit der Bearbeitungszeit nahezu identisch zueinander. P-O weist konstant die niedrigsten Kennwerte auf und wird mit ähnlicher Intensität wie St und AR-O bearbeitet. Die dargestellte Streuung der Messwerte (vgl. Abbildung 7-9) resultiert

² Da Prüffläche B nur minimale Ergebnisunterschiede im Zeitverlauf ausweist, wurde an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet.

aus der Bearbeitung mit verschiedenen Schleifkörpern in den Versuchen 1 bis 4 sowie aus dem Bearbeitungszeitintervall von einer bis sieben Stunden. Auffällig ist, dass an den Prüfflächen, die auf Grund von Stufeneffekten hohe Anfangsmesswerte aufweisen (siehe Prüffläche St und AR-O), breitere Streubereiche ermittelt wurden, wohingegen die Streubereiche der Prüfflächen mit niedrigeren Anfangswerten zu kleineren Streubereichen tendieren. Das Bearbeitungsergebnis hängt hier entscheidend von den ausgewählten Schleifkörpern und der Bearbeitungszeit ab.

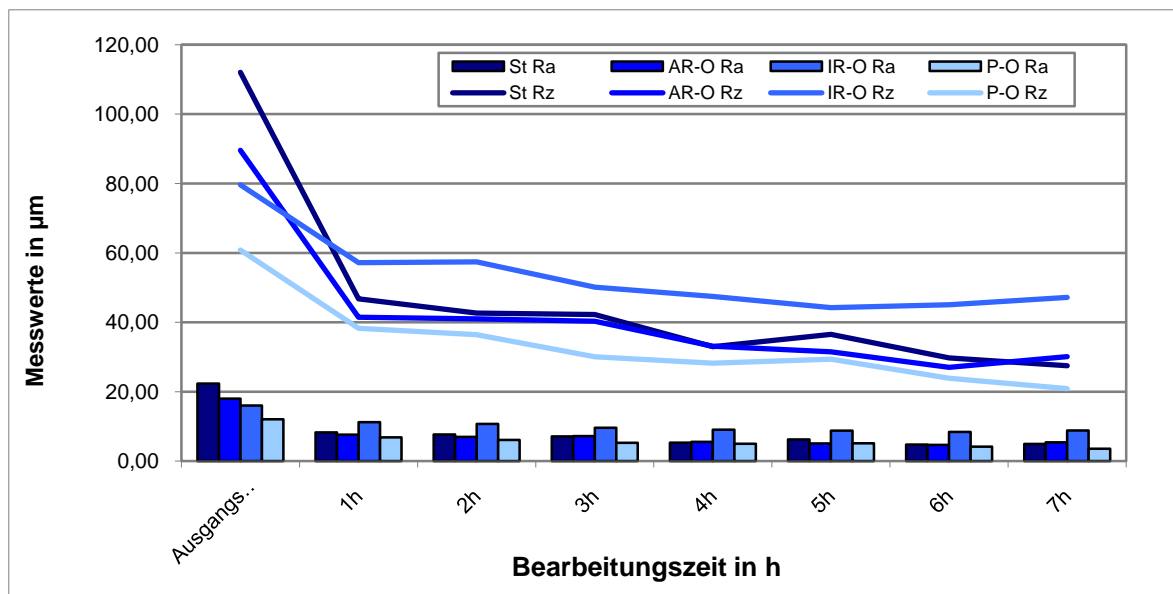


Abbildung 7-10: Einfluss der Unzugänglichkeit auf das Bearbeitungsergebnis

Weniger entscheidend ist dies an Flächen, die während der Fertigung parallel zur Bauebene lagen. Hier zeigt sich, aufgrund der reinen Abhängigkeit der Oberflächenqualität von der vorliegenden Pulverkörnung, ein gleichmäßigeres Bearbeitungsbild. Es resultieren kleinere Streubereiche an den Prüfflächen P-O und P-U. An Flächen, die in der Ausgangssituation von Stufeneffekten geprägt sind, liegt eine ungleichmäßigere Oberflächentopographie mit dünnen Rauheitsspitzen vor, die höhere Abtragsleistungen zulässt. Das Schleifergebnis hängt hier essentiell von der Schleifleistung der einzelnen Schleifkörperarten ab.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 7-11 die Schleifwirkung der betrachteten Schleifkörper an den Prüfflächen St, die die höchste Streuung aufweist, und P-U, die die geringste Streuung aufweist, über der Bearbeitungszeit aufgetragen. Die Schleifkörper weisen unterschiedliche Bearbeitungseffekte an Prüfflächen mit verschiedenen Ausgangssituationen auf, wobei hier das relative Gewicht pro Volumeneinheit und Schleifkörperform den Ausschlag geben (vgl. Tabelle 7-2). Als universell einsetzbar

erwiesen sich die Schleifkörper KG 12 und KX 12, die sowohl an Flächen mit großer Rauheit als auch an denen mit kleiner Rauheit in der Ausgangssituation, mitunter die besten Ergebnisse erzielen.

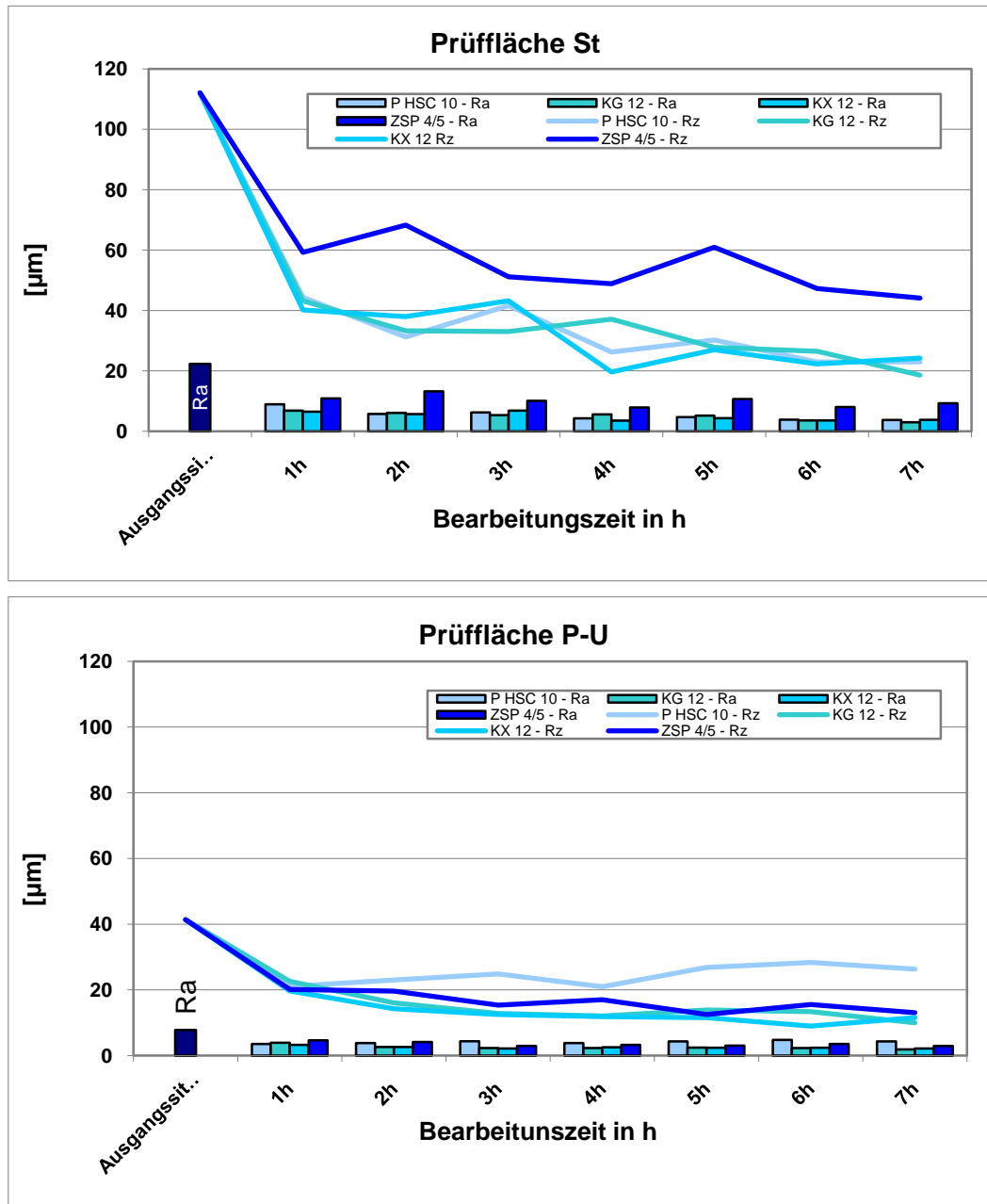


Abbildung 7-11: Schleifkörperwirkung bei hohen (oben) und niedrigeren (unten) Anfangskennwerten

Als weniger flexibel zeigen sich die Schleifkörperarten P HSC 10 und ZSP 4/5. Zwar konnte mit beiden eine Verbesserung an den Prüfflächen St und P-U erzielt werden, jedoch fällt diese für P HSC 10 an der eher glatten Prüffläche P-U und für ZSP 4/5 an der rauen Prüffläche St deutlich geringer als die Verbesserung durch die übrigen Schleifkörper aus. ZSP 4/5 Schleifkörper besitzen die geringste Masse pro Volumeneinheit und das mit Abstand kleinste Volumen. Es kann nur geringer Schleifdruck

erzeugt und keine hohe Schleifleistung erreicht werden. Der Schleifkörper kann daher den zum Ausgleich der Stufeneffekte benötigten Abtrag nur bedingt erzeugen und trägt lediglich kleine Rauheitsspitzen ab.

Anders hingegen die Schleifkörperart P HSC 10, die durch eine höhere Dichte im Vergleich zu den Schleifkörperarten KG 12 und KX 12 in Kombination mit der kantigen Form den höchsten Abtrag erzielt. Durch die Verwendung von P HSC 10 Schleifkörpern zum Vorschleifen und nachfolgende Bearbeitung durch KG 12 oder KX 12 sowie anschließend Polieren durch ZSP 4/5 kann der R_a Wert auf minimal $1,86\text{ }\mu\text{m}$ verbessert werden.

Die experimentelle Bearbeitung zeigt, dass mit steigender Bearbeitungszeit insgesamt mit einer Verringerung der Messwerthöhe zu rechnen ist, was durch den fortschreitenden Abtrag an den Prüfflächen zu erklären ist. Ausnahmen bestehen für P HSC 10, der an der Prüffläche P-U so großen Abtrag erzeugt, dass nach anfänglichem Absinken ein Anstieg der Kennwerte zu verzeichnen ist. Unregelmäßigkeiten ergeben sich des Weiteren bei ZSP 4/5. Die Verbesserung über der Zeit erfolgt nicht linear, sondern schwächt in der fortschreitenden Bearbeitungszeit stark ab. So sind die größten Verbesserungen bereits nach einer Stunde Bearbeitungszeit zu verzeichnen (vgl. Abbildung 7-11).

Insgesamt betrachtet, eignet sich das Verfahren, um schnell gute Verbesserungen der Oberflächentopographie von flachen oder nach außen orientierten runden Flächen zu erzeugen bzw. gleichmäßigere Oberflächen zu schaffen. Es sind große Verbesserungen der anfänglichen Messwertbeträge erreichbar. Der Effekt an Innenrundungen und schwer zugänglichen Flächen ist vergleichsweise gering, so dass hier klare Schwächen des Verfahrens liegen. Es besteht zudem die Gefahr, dass Schleifkörper in schwer zugänglichen Spalten und Bohrungen verkanten und eine fortlaufende Bearbeitung dieser Flächen verhindern. Des Weiteren bewirkt die Bearbeitung eine Kantenabrundung, die, je nach Schleifkörperart, unterschiedlich stark ausfällt und ggf. die Funktionalität von Bauteilen beeinträchtigen kann. Von der Bearbeitungseffektivität nicht hinderlich, aber als störend bei der optischen Auswertung des Schleifergebnisses erweist sich die Färbung der Bauteile aufgrund von Schleifkörperabrieb. Insbesondere bei der Bearbeitung durch P HSC 10 trat dieser Effekt auf, der jedoch durch die Beimischung von entsprechenden Compounds kompensiert werden kann.

7.2.4 Infiltrieren

7.2.4.1 Verfahren

Infiltrieren ist ein füllendes Verfahren, das gem. DIN 8593-2 der Untergruppe „Tränken“ aus der in DIN 8580 eingeteilten Hauptgruppe „Fügen“ zugeordnet wird. In den Verfahrensvariationen wird das Einbringen des Infiltrationsmediums mittels Druck-Infiltration, von der drucklosen Infiltration unterschieden, wobei die Wahl einer Variante werkstückspezifisch und funktional festzulegen ist.

Die Nachbearbeitungsversuche zur Infiltration erfolgten durch die drucklose Infiltration der Prüfkörper mit Epoxidharz und Wachs, durchgeführt von der Voxeljet Technology GmbH. Bei der drucklosen Infiltration wird das Bauteil in ein Bad mit Infiltrationsflüssigkeit getaucht, bis es vollständig vom Infiltrationsmittel durchtränkt ist. Dieser Vorgang wird dann wiederholt, bis das Werkstück keine zusätzliche Flüssigkeit mehr aufnimmt.

Entscheidend für den Erfolg des Verfahrens ist dabei eine hohe Porosität des Werkstücks, da über Porenkanäle die Infiltration des gesamten Bauteils erfolgt. Bei erfolgreicher Anwendung können durch Infiltration die mechanischen Eigenschaften verbessert und die Oberflächenqualität, in Abhängigkeit vom verwendeten Infiltrationsmittel, gesteigert werden^[70].

7.2.4.2 Auswertung und Diskussion

Die Nachbearbeitung mittels Infiltration weist in Abhängigkeit der Prüffläche äußerst unterschiedliche Ergebnisse auf. So konnte an B mit Wachs eine maximale Verbesserung der Kennwerte R_a und R_z um 79 % auf $3,9 \mu\text{m}$ für R_a und $19,35 \mu\text{m}$ für R_z realisiert werden. Einen Gesamtüberblick des Bearbeitungsergebnisses für Infiltrieren gibt Abbildung 7-12.³

³ Die Größenverhältnisse von R_z sind ähnlich dimensioniert, so dass hier auf die Darstellung verzichtet wurde.

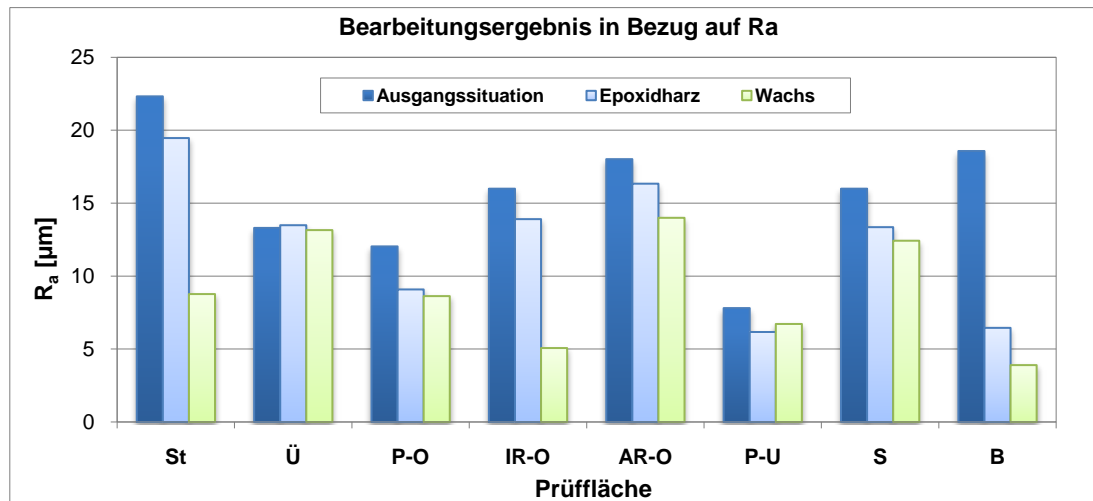


Abbildung 7-12: Bearbeitungsergebnis Infiltrieren für Ra

Bei Betrachtung des Bauteilinneren zeigt sich, dass der Prüfkörper keine ausreichend tiefen und großen Porenkanäle aufweist und durch die Infiltration lediglich Poren an der Bauteiloberfläche ausgefüllt werden können (vgl. Abbildung 7-13). Die Verbesserung fällt dementsprechend umso stärker aus, je poröser die Prüffläche in der Ausgangssituation ist.



Abbildung 7-13: Querschnitt bei infiltriertem Prüfkörper

Deutlich wird dies im Vergleich der Prüfflächen St und Ü. Beide weisen aufgrund der Schichtbaustruktur des LS Verfahrens fertigungsbedingte Stufeneffekte auf. An Ü werden diese jedoch durch die Tendenz der Schichtränder zu einer Wölbung nach oben hin kompensiert, so dass Ü eine sehr geringe Porosität aufweist. An St begünstigt die Wölbungstendenz der Schichtränder die Porosität der Fläche. Im Ergebnis ist an St für beide Infiltrationsmedien eine deutliche Verbesserung festzustellen, wohingegen an Ü nahezu keine Verbesserung erkennbar ist. Die geringfügige Steigerung des Kennwertes R_a an Ü durch die Infiltration mit Epoxidharz fällt von der Größenordnung her in den Streubereich der Ausgangssituation dieser Prüffläche.

Ein weiteres Kriterium für den Erfolg des Verfahrens und das Ausmaß der Oberflächenverbesserung stellt die Prüfflächengeometrie dar. So zeigt das Bearbeitungsergebnis insbesondere an Innenrundungen (vgl. Prüffläche IR-O und B) gute Verbesserungen der Kennwerte R_a und R_z . Die Prüfflächengeometrie begünstigt die Bildung

höherer Schichtdicken. Ebene Flächen bieten diese Möglichkeit nicht, so dass hier deutlich geringere Effekte entstehen.

Ein weiterer gravierender Unterschied ergibt sich durch das verwendete Infiltrationsmittel. Zwar weisen sowohl die Bearbeitung mit Epoxidharz als auch die mit Wachs eine Verbesserung der Oberflächentopographie auf, jedoch wurden mit Wachs deutlich bessere Ergebnisse erzielt. Ursache hierfür ist das unterschiedliche Trocknungsverhalten als Resultat verschiedener Einsatzgebiete. Während Epoxidharz bis in das Bauteilinnere vordringen soll, ist Wachs speziell für die Oberflächenverbesserung gedacht und verfestigt dementsprechend schneller. Auf diese Weise können in kürzerer Zeit dickere Schichten zum Ausgleich der Rauheitsspitzen gebildet werden.

Die Bearbeitungsversuche haben gezeigt, dass das Verfahren zum Einsatz an stark porösen Oberflächen und schwer zugänglichen Flächen geeignet ist, was insbesondere durch den Bearbeitungserfolg an den Prüfflächen IR-O und B belegt wird. Klare Nachteile ergeben sich jedoch an ebenen Flächen und Außenrundungen. Generell wird an Flächen mit geringer Porosität, nur eine minimale Verbesserung erzielt. Das Gesamtergebnis ist somit nicht zufriedenstellend. Ebenso eignet sich das Verfahren nicht zur Vorbereitung weitergehender Bearbeitungen.

7.2.5 Lackieren

7.2.5.1 Verfahren

Beim Lackieren handelt es sich um ein Verfahren zur Erzeugung schützender oder dekorativer Beschichtungen für Werkstückoberflächen mittels flüssiger oder pulverförmiger Ausgangsstoffe. Es ist gem. DIN 8580 der Gruppe „Beschichten aus dem flüssigen Zustand“ im Bereich der beschichtenden Fertigungsverfahren zugeordnet. Im Allgemeinen wird zwischen lösungsmittelhaltigen Lacken, wasserhaltigen Lacken und pulverförmigen Lacken differenziert. Diese unterscheiden sich sowohl in ihrer Zusammensetzung als auch in ihrer Funktion. Alle Lacke enthalten Filmbildner, die den Zusammenhalt der Beschichtung und die Haftung auf dem Untergrund bewirken sowie Pigmente zur Farbgebung des Lackes. Füllstoffe, die das Volumen der Lackschichten ausfüllen, werden zur Stabilisierung des Schichtaufbaus und zur Vermeidung von Trocknungsrissen beigemischt. Bei der Auswahl eines Lacksystems muss genau zwischen den Vor- und Nachteilen der Lacksysteme abgewogen werden. So sind z.B. Wasserlacke zwar umweltverträglicher und können auf den gleichen Anlagen wie lösemittelhaltige Lacke verwendet werden, jedoch liegen die erreichbaren

Oberflächenqualitäten ggf. niedriger [56]. Der Auftrag einer Lackschicht kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, wobei sich in der industriellen Fertigung das Lackieren durch Spritzen, Gießen, Rollen und Tauchen am stärksten durchgesetzt hat [71].

Die Nachbearbeitung durch Lackieren wurde im Rahmen dieser Arbeit von der Firma Hoerdler rapid Engineering GmbH durchgeführt. Zum Vergleich der Verbesserung durch reines Lackieren mit dem Verbesserungspotential des Lackierens an vorbehandelten Werkstücken wurde die Prüffläche S mit einer Masse auf Epoxidbasis gespachtelt, geschliffen und anschließend lackiert. Im Sprühverfahren wurde ein wasserhaltiger Decklack manuell aufgetragen.

7.2.5.2 Auswertung und Diskussion

Durch das reine Lackieren des Prüfkörpers konnte insgesamt nur eine mäßige Verbesserung der Oberflächenqualität erreicht werden. Eine Gesamtübersicht des realisierten Ergebnisses ist in Abbildung 7-14 gegeben. Zwar sind die Kennwerte R_a und R_z teilweise deutlich durch das Lackieren gesunken, jedoch ist diese Verbesserung der Oberflächenqualität stark von der betrachteten Prüffläche abhängig. R_a und R_z verbessern sich bspw. maximal um 59 % (R_a) bzw. 78 % (R_z) und die Absolutwerte sinken für R_a auf 4,42 μm bzw. für R_z 19,44 μm (gemessen an P-U).

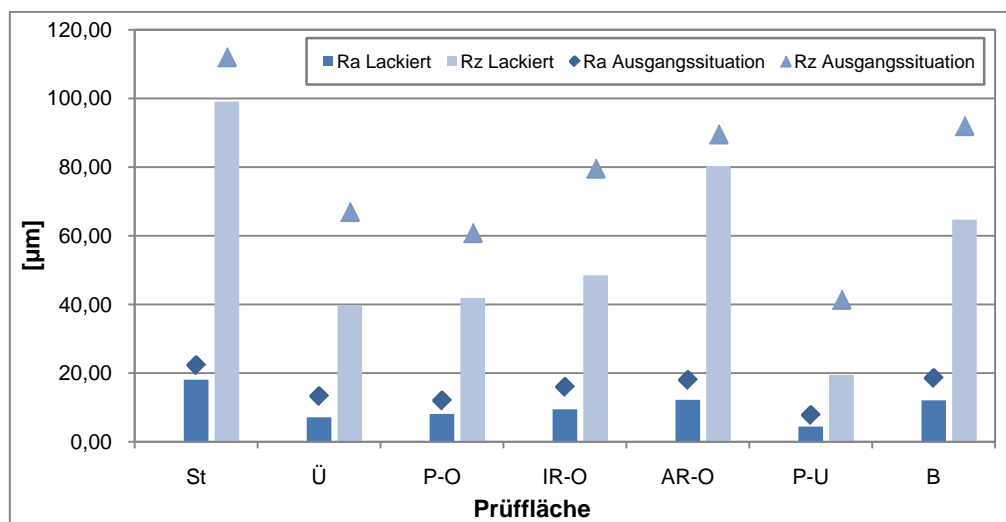


Abbildung 7-14: Bearbeitungsergebnis Lackieren

Andere Flächen (vgl. Prüffläche St und AR-O) weisen hingegen nur einen minimalen Bearbeitungserfolg auf. Die Ursache für dieses ungleichmäßige Ergebnis liegt in der Ausgangssituation an den einzelnen Prüfflächen begründet. So sind die Prüfflächen

St und AR-O sowohl vor als auch nach dem Lackiervorgang deutlich durch Poren und Spalten gekennzeichnet.

Zudem fällt bei Betrachtung der aufgezeichneten Oberflächenprofile grober Oberflächen vor und nach dem Lackieren (hier Prüffläche St in Abbildung 7-15) auf, dass die Menge der tief in das Bauteilinnere ragenden dünnen Risse deutlich abgenommen hat. Die verbleibenden hohen Beträge der Rauheitskennwerte und deren große Unsicherheit werden vorwiegend durch hohe Rauheitsspitzen und breite Täler hervorgerufen.

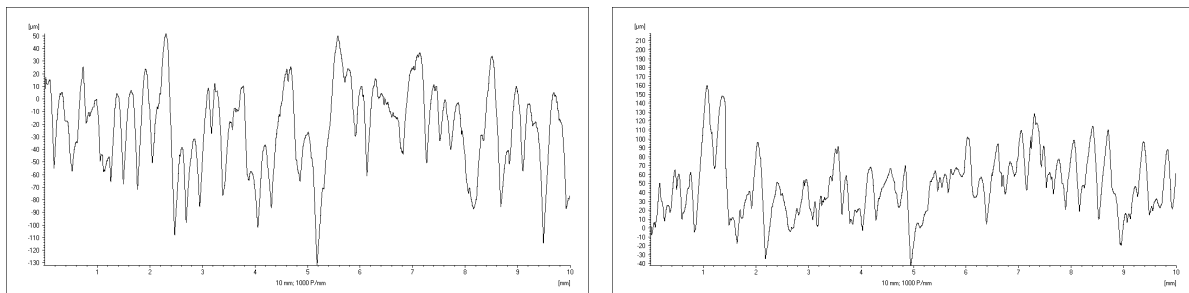


Abbildung 7-15: Oberflächenprofil Fläche St unlackiert (links) und lackiert (rechts)

Die erzeugte Farbschichtdicke der Lackierung ist zum Einebnen der in der Ausgangssituation vorhandenen porösen Oberfläche nicht ausreichend. Fällt der Stufeneffekt geringer aus bzw. bilden sich aufgrund der geometrischen Prüfflächenform stärkere Farbschichten, so sind gute Verbesserungen zu erzielen (vgl. Prüffläche IR-O). An Prüfflächen mit unporöser Oberflächentopografie, die keine Stufeneffekte aufweisen, ist die Farbschicht ebenso ausreichend, um Unregelmäßigkeiten geringeren Ausmaßes auszugleichen. So konnten an Prüffläche P-U die niedrigsten Kennwertbeträge ohne Vorbehandlung erreicht werden. Die Unsicherheit der Messwerte schwankt für R_a zwischen $0,47 \mu\text{m}$ und $2,97 \mu\text{m}$, sowie für R_z zwischen $1,21 \mu\text{m}$ und $10,15 \mu\text{m}$.

Anders hingegen fällt das Bearbeitungsergebnis für Lackieren mit Vorbehandlung durch Spachteln und Schleifen aus (vgl. Abbildung 7-16). Hier konnten die Kennwerte R_a und R_z um bis zu 92 % auf $1,04 \mu\text{m}$ für R_a und $5,67 \mu\text{m}$ für R_z reduziert werden. Für R_{max} wurde ein Wert von $9,74 \mu\text{m}$ realisiert.

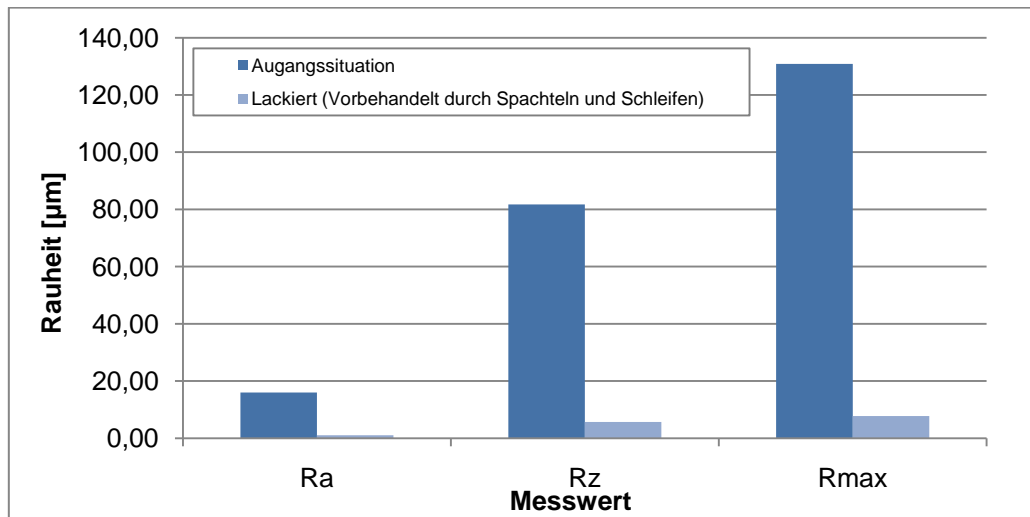


Abbildung 7-16: Bearbeitungsergebnis mit Vorbehandlung durch Spachteln und Schleifen

Die Unsicherheit für die bearbeitete Prüffläche S beträgt $0,037 \mu\text{m}$ für R_a und $0,252 \mu\text{m}$ für R_z . Im Ergebnis resultiert eine Oberfläche mit sehr niedrigen Kennwerten und äußerst gleichmäßiger Beschaffenheit.

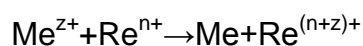
Rein theoretisch besteht dementsprechend die Möglichkeit, größere Verbesserungen mit höheren Schichtdicken zu erzielen. Dies ist jedoch nur schwer realisierbar und je nach Lackierverfahren nicht prüfflächenspezifisch steuerbar bzw. sehr arbeitszeintensiv. Ein effizienter Einsatz des Verfahrens zur gleichmäßigen Verbesserung der Oberflächen ist aufgrund der stark variierenden Ausgangssituation an den Prüfflächen nicht möglich. Die geringeren Beträge der Rauheitskennwerte an Prüffläche S lassen erkennen, dass die Oberflächentopografie durch eine vorbereitende Behandlung der Prüfflächen stark verbessert werden kann. Die hohen Rauheitsspitzen und Täler an Prüffläche S können durch Spachteln und anschließendes Abschleifen aufgefüllt und geglättet werden. Die aufgetragene Lackschicht reicht somit zum Ausfüllen der restlichen Unregelmäßigkeiten aus. Der Einsatz des Lackierens ist sowohl zum Erzielen guter Nachbearbeitungsergebnisse als auch im Hinblick auf den Kostenfaktor (Arbeitszeit, Betriebskosten, Material), nur bei entsprechender Vorbehandlung der Werkstücke möglich.

7.3 Andere Möglichkeiten zur Oberflächenbearbeitung: (Das Metallisieren)

Eine andere Möglichkeit zur Veredelung von lasergesinterten PA-Bauteilen ist das Metallisieren. Es umfasst alle Verfahren der Oberflächentechnik, die dazu dienen, Werkstücke aus metallischen oder polymeren Grundstoffen zwecks Steigerung der Funktionalität und der dekorativen Wirkung mit metallischen Überzügen zu versehen.

Von besonderer industrieller Bedeutung ist dabei das Metallisieren von Kunststoffen. Zum einen kann der Verbund aus hochpolymeren Werkstoffen und Metallen oftmals höheren chemischen und physikalischen Belastungen ausgesetzt werden und zum anderen können durch das kostengünstige Grundmaterial Wettbewerbsvorteile generiert werden [72]. Die wichtigsten Methoden zum Auftragen von Metallschichten auf Kunststoffwerkstücken sind das chemische sowie das galvanische Beschichten. Diese werden gem. DIN 8580 der Untergruppe „Beschichten aus dem ionisierten Zustand“ zugeordnet. Die Funktionalität metallisierter Kunststoffbauteile wird durch das Haften der Metallschicht auf der Kunststoffoberfläche gewährleistet. Dazu haben sich in der Praxis diverse, an den jeweiligen Grundstoff anpassbare Verfahren zur Vorbehandlung etabliert. Durch die mechanische Verankerung und/oder chemische Bindung des Metalls an die Kunststoffoberfläche soll das Ablösen der Metallschicht im Belastungsfall verhindert werden. Die weiteste Verbreitung findet die „klassische“ Vorbehandlung, bei der die Kunststoffoberfläche zunächst durch Beizen aufgeraut und im Anschluss durch Setzen von Edelmetallkeimen (meist Palladiumkeime) aktiviert wird. Für Polyamid wird unter anderem ein Bad aus Calcium- und Aluminiumsalzen, eine salzsäurehaltige Lösung oder eine tensidhaltige Lösung von organischen Säuren zum Beizen verwendet. Anschließend wird mit einem kolloidalen Palladium-Zinn-Aktivator bekeimt. Durch das Bayshield Verfahren der Bayer AG besteht zudem die Möglichkeit, PA-Werkstücke mit einer Nickel-versetzten Kunststoffformulierung im Sprühverfahren zu bekeimen und im Anschluss chemisch zu verkufern [56] [72] [73].

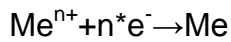
Chemisches Metallisieren ist das Abscheiden von Metall aus Schwermetallsalzlösungen auf der Werkstückoberfläche ohne Anlegen eines elektrischen Stroms. Dazu wird die Werkstückoberfläche zuvor mit Hilfe von Reduktionsmitteln aktiviert. Die wichtigsten Metalle dieses Verfahrens sind Kupfer und Nickel. Die stattfindende Reaktion kann wie folgt beschrieben werden:



Me^{z+} ist dabei ein Metallion mit z-fach positiver Ladung, Re^{n+} ein Reduktionsmittel mit Oxidationszahl n, Me das Metall und $\text{Re}^{(n+z)+}$ das oxidierte Reduktionsmittel.

In einem zweiten Schritt kann die chemisch abgeschiedene Schicht durch galvanisches Beschichten verstärkt werden. Alle Verfahren, bei denen eine Metallschicht elektrolytisch, also unter Zufuhr von elektrischem Strom, abgeschieden wird, werden unter dem Begriff Galvanisieren zusammengefasst. Kern des Galvanisierens ist ein

Elektrolyt, in dem sich Metallionen befinden. Eine Anode sowie das als Kathode geschaltete und zu metallisierende Werkstück werden in den Elektrolyt getaucht. Eine äußere Stromquelle liefert die zur Entladung der Metallionen notwendigen Elektronen. Die Reaktion am Werkstück kann wie folgt beschrieben werden:



Das Verfahren weist ein großes Spektrum an verwendbaren Metallen auf, wobei für die Kunststoff-Galvanisierung in erster Linie Kupfer, Nickel und Chrom von industrieller Bedeutung sind. Die Einebnung ist ein Maß für die Verbesserung der Oberflächenqualität auf Grund des Metallisierens. Sie lässt sich wie folgt ermitteln:

$$E = 100 \cdot (R_{z,\text{vorher}} - R_{z,\text{nachher}}) / R_{z,\text{vorher}}$$

Das Ausmaß der Verbesserung ist dabei von der Stärke des erzeugten metallischen Überzuges abhängig, mit dem fertigungsbedingte Abweichungen (z.B. Risse) ausgefüllt bzw. abgedeckt werden können. Ungünstig ist die stark variierende Ausgangssituation an den verschiedenen Prüfflächen in Bezug auf die Rauheit. So wären ohne Oberflächenvorbehandlung minimal Metallschichten von 82 µm (vgl. Prüffläche P-U) Dicke notwendig um die maximale Rautiefe auszufüllen und maximal 173 µm (vgl. Prüffläche St).

8 Zusammenfassung

In meiner Arbeit wurde zuerst in dem 5. Kapitel der Einfluss unterschiedlicher Bauprozessfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften der lasergesinterten Kunststoffbauteile erforscht. Speziell wurde das Verhalten des Materials hinsichtlich der Scanstrategien betrachtet. Daraus wurde festgestellt, dass die Belichtungsstrategie einen maßgeblichen Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten hat.

Mit den Parallel-Strategien lässt sich keine homogene Gefügestruktur erzeugen und somit bleiben die mechanischen Eigenschaften bei dieser Art von Scanstrategien orientierungsabhängig. Bei der alternierenden Kreuzstrategie hingegen spielt die axiale Ausrichtung der Bauteile in der XY-Ebene keine wesentliche Rolle. Die Y-Parallelstrategie bietet Vorteile im Bezug auf die maximal erreichbare Zugfestigkeit und den Elastizitätsmodul gegenüber der Kreuzstrategie & der X-Parallel-Strategie. Bei den Parallelstrategien war die Zugfestigkeit der Y-Proben um bis 7 % größer als die von den X-Proben. Bei den Proben, die mit der Kreuzstrategie gebaut wurden, haben die X - und die Y -Proben die gleichen mechanischen Eigenschaften; deren Werte liegen im Durchschnitt zwischen denen von den Y- und X-Parallel-Proben.

Die Doppel-Belichtungsfunktion ist aus wirtschaftlichen Gründen erst ab Laserleistung von 5 W zu empfehlen. Bei einer doppelten Belichtung mit der Standardlaserleistung ($P_L = 7 \text{ W}$) steigt die Zugfestigkeit um bis zu 13,28 %.

Durch den Einsatz von Outline-Funktion lässt sich nicht nur die Oberflächenqualität verbessern sondern steigt auch die Zugfestigkeit um bis 8,81 %.

Der Bauprozess kann mittels der Erhöhung der v_s , D_s oder h_s beschleunigt werden. Das wird aber negative Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben. Durch die Anpassung der Laserleistung können diese negativen Einflüsse kompensiert werden. In Bezug auf die Materialgrenzwerte der Energiedichte pro Flächeneinheit und der Streckenenergie konnte ein Stabilitätsbereich für jeden einzelnen Parameter definiert werden, in dem er zur Konstanthaltung der gewünschten mechanischen Eigenschaften trotz der Beschleunigung des Bauprozesses beitragen wird (vgl. Tabelle 8-1). Die ermittelten Stabilitätsbereiche gelten aber nur für das Material PA 12 und nur bei einer Vorwärmtemperatur von ca. 174 °C.

Wenn die Obergrenze der E_s und der E_f überschritten wird, kommt es zu einer Materialersetzung an der Schichtoberfläche und somit zum starken Abfall der Festigkeit.

Die maximale Streckenenergie für PA 12 bei Vorwärmtemperatur von 174 °C beträgt: 9,5 mJ/mm Die maximale Flächenenergie für PA 12 bei Vorwärmtemperatur von 174 °C beträgt: 50 mJ/mm ²			
Prozessparameter	Minimal Wert	Maximal wert	Begrenzungsgrund
h_s	0,08mm [*]	0,25mm ^{**}	*: Anlagebedingt **: Streckenenergie ***: Flächenenergie
V_s	400mm/s	3054mm/s	
D_s	0,08mm	<0,14mm ^{***}	

Tabelle 8-1: Stabilitätsbereiche der Prozessparameter

Für die weiteren Werkstoffkennwerte, wie die Bruchdehnung und der E-Modul, gelten ähnliche Verhältnisse wie für die Zugfestigkeit (siehe Anhang 9).

Die Oberflächenrauheit beim LS-Verfahren ist prinzipbedingt schlechter als bei den RP-Verfahren, die auf Basis flüssiger Ausgangsstoffe arbeiten, oder bei den traditionellen Verfahren. Deswegen wurde in dem 6. Kapitel analysiert, welche Wirkung die Hauptprozessparameter innerhalb ihrer Stabilitätsbereiche und bei konstanter Energiedichte auf die Oberflächenrauheit der LS-Bauteile haben. Dabei wurde festgestellt, dass die Schichtdicke und der Outlinelaser den größeren Einfluss auf die Oberflächenrauheit der LS-Bauteile ausüben. Die Obergrenze für die Schichtdicke in Bezug auf die erreichbare Oberflächenqualität lag auch bei $D_s = 0,13 - 0,15$ mm. Die Outlinelaser-Funktion ist in Bezug auf die Oberflächenqualität ebenfalls empfehlenswert, denn durch ihren Einsatz konnte die Oberflächenrauheit um bis 37,6 µm verringert werden.

Die Anordnung bzw. die Orientierung der Bauteile in dem Bauraum der Sinteranlage spielt auch eine große Rolle bei dem Verbesserungsprozess von der Oberflächenrauheit. Es soll versucht werden, die wichtigen Oberflächen parallel oder mindestens senkrecht zur Bauebene zu orientieren. Generell sollten kleine Neigungswinkel zur Bauebene zwischen 10° und 30° vermieden werden. Da die Rautiefe bei diesen Winkeln wegen des großen Abstandes zwischen den nach oben gewölbten Schichträndern am größten ist. Die anderen Prozessparameter wie Scangeschwindigkeit, Linienabstand und die alternierende Scanstrategie haben weder positiven noch negativen Einfluss auf die Oberflächenrauheit innerhalb ihrer Variationsbereichen dank der Konstanthaltung der Energiedichte.

Bei den Untersuchungen wurden andere Einflussgrößen wie das Pulvermaterial und die Sinteranlage für jede Versuchsreihe als konstant und gegeben betrachtet. Unter dieser Bedingung sind alle Ergebnisse als relativ zu betrachten und das Entscheidende ist das Verbesserungspotenzial der mechanischen und optischen Eigenschaften, das in der Änderung bzw. Optimierung der Prozessparameter steckt.

Die Oberflächentechnik bietet ein breites Feld an Verfahren zum Erzielen funktionaler oder dekorativer Oberflächeneigenschaften. Ein besonderes Interesse gilt der Nachbearbeitung von LS Bauteilen aus PA, die sehr gute mechanische Eigenschaften aufweisen, und durch gezielte Nachbearbeitung der fertigungsbedingt rauen Oberfläche als fertiges Produkt vermarktet werden können. Die einzelnen Bauteilflächen weisen jedoch in Abhängigkeit von ihrer Lage im Bauraum und ihrer Geometrie starke Unterschiede in Bezug auf die Rauheit auf, so dass einzelne Verfahren bzw. Verfahrensprofile gezielt für die Nachbearbeitung der jeweiligen Ausgangssituation ausgewählt werden müssen. Die in dieser Arbeit ausgewählten Nachbearbeitungsverfahren basieren auf verschiedenen mechanischen und chemischen Wirkmechanismen und führen flächenspezifisch zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen. Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der minimal erreichten Messwerte der Kenngrößen R_a und R_z an der Seitenfläche (S) des Prüfkörpers liefert Tabelle 8-2.

Verfahren	R_a [μm]	R_z [μm]
Ausgangssituation	15,99	81,75
Strahlen	9,25	47,36
Fräsen	1,06	6,08
Gleitschleifen	2,65	16,95
Infiltrieren	12,43	61,56
Lackieren	13,82	72,50
Lackieren mit Vorbehandlung	1,04	5,67

Tabelle 8-2: Beste Bearbeitungsergebnisse an Prüffläche S

Anhand der Bearbeitungsergebnisse der ausgewählten Verfahren zeigt sich, dass zwischen den Verfahren starke Diskrepanzen in Bezug auf die Qualität des Bearbeitungsergebnisses bestehen. Der effiziente Einsatz einiger Verfahren (bspw. das Lackieren) ist auf Bereiche mit geringerer Rauheit beschränkt. Zwar besteht bei dem Großteil der betrachteten Verfahren theoretisch die Möglichkeit, auch größere Rauheiten auszugleichen, jedoch ist dies meist mit unverhältnismäßig großem Aufwand verbunden und somit unwirtschaftlich. Eine Bewertung des Verbesserungspotenzials der Verfahren bei unterschiedlichen Anfangsrauheiten wurde in Tabelle 8-3 vorgenommen.

Verfahren	Flächenrauheit vor der Bearbeitung		
	gering $R_a \leq 10 \mu\text{m}$ $R_z \leq 50 \mu\text{m}$	mittel $10 \mu\text{m} < R_a < 18 \mu\text{m}$ $50 \mu\text{m} < R_z < 85 \mu\text{m}$	hoch $R_a \geq 18 \mu\text{m}$ $R_z \geq 85 \mu\text{m}$
Strahlen	+/-	+-	-
Fräsen	+	++	++
Gleitschleifen	+	+/++	++
Infiltrieren	-	-	+ (Wachs)
Lackieren	+/-	--	-/--
Lackieren mit Vorbehandlung	+	++	++
Metallisieren	(+/-)	(-)	(-)

Bewertung: sehr gut: ++ gut: + mäßig: +- gering: - gar kein: --
 Verbesserung: >80% 50%-80% 35%-50% 15%-35% <15%

Tabelle 8-3: Bewertung des Verbesserungspotentials der betrachteten Verfahren

Zu diskutieren bleibt, wie die Verfahren zielgerichtet kombiniert werden können, um minimale Rauheitskennwerte unter wirtschaftlichem Ressourceneinsatz zu realisieren. Es ist zunächst von hohen Rauheitskennwerten auszugehen, was eine Bearbeitung durch Gleitschleifen nahe legt. Durch das Gleitschleifen können insbesondere große Rauheiten, die aus Stufeneffekten resultieren, schnell und mit wenig Aufwand verringert werden. Zu beachten ist, dass der Schleifprozess eine Kantenabrundung bewirkt, die sich mit der Bearbeitungszeit verstärkt. Zu empfehlen ist eine Bearbeitungszeit von einer bis maximal zwei Stunden. Eine vom Ergebnis her gute, aber aufwendigere Alternative zum Gleitschleifen ist das Fräsen. Infiltrieren ist, trotz guten Bearbeitungsergebnisses bei großer Rauheit, nicht zu empfehlen, da aufgrund der erzeugten Schicht keine weiteren Bearbeitungsschritte erfolgen können. Durch das Auftragen einer Lack- oder Metallschicht können kleinere Restrauheiten aufgefüllt und ausgeglichen werden und für größere Rauheiten empfiehlt es sich eine vorbereitende Behandlung der Prüfflächen mittels Gleitschleifen oder Spachteln. Die Bearbeitung durch Strahlen ist nur zum Reinigen der Bauteile von Anlagerungen zu empfehlen.

9 Anhang: E-Module- & Bruchdehnungsdiagramme vom kapitel 5

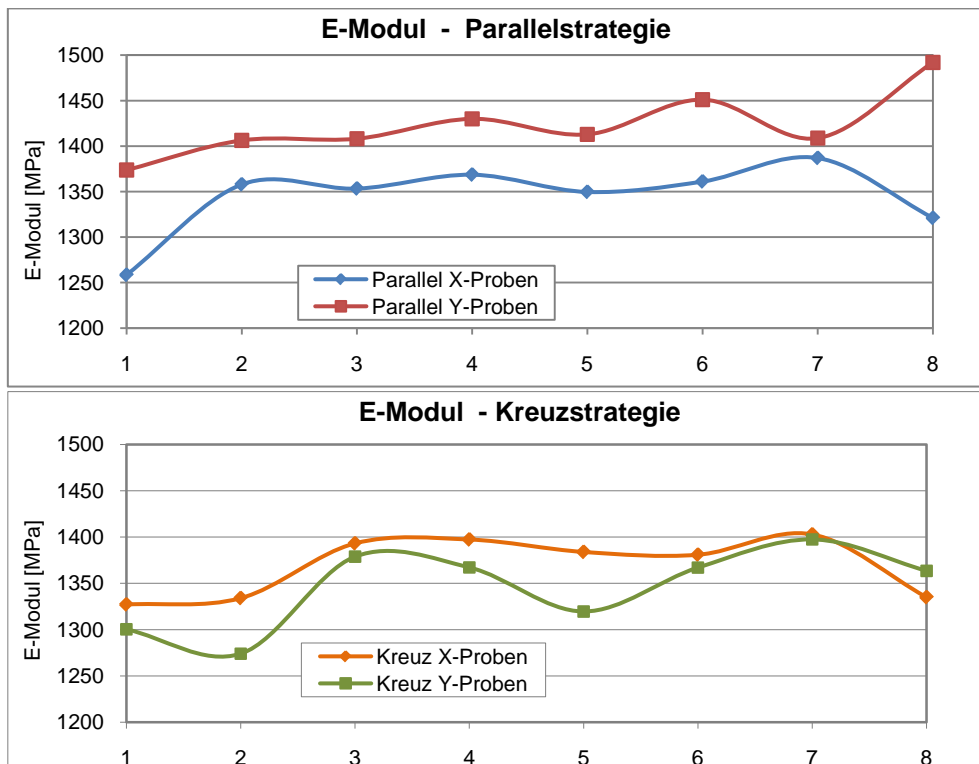


Abbildung 9-1: Elastizität in Abhängigkeit von Scanstrategien

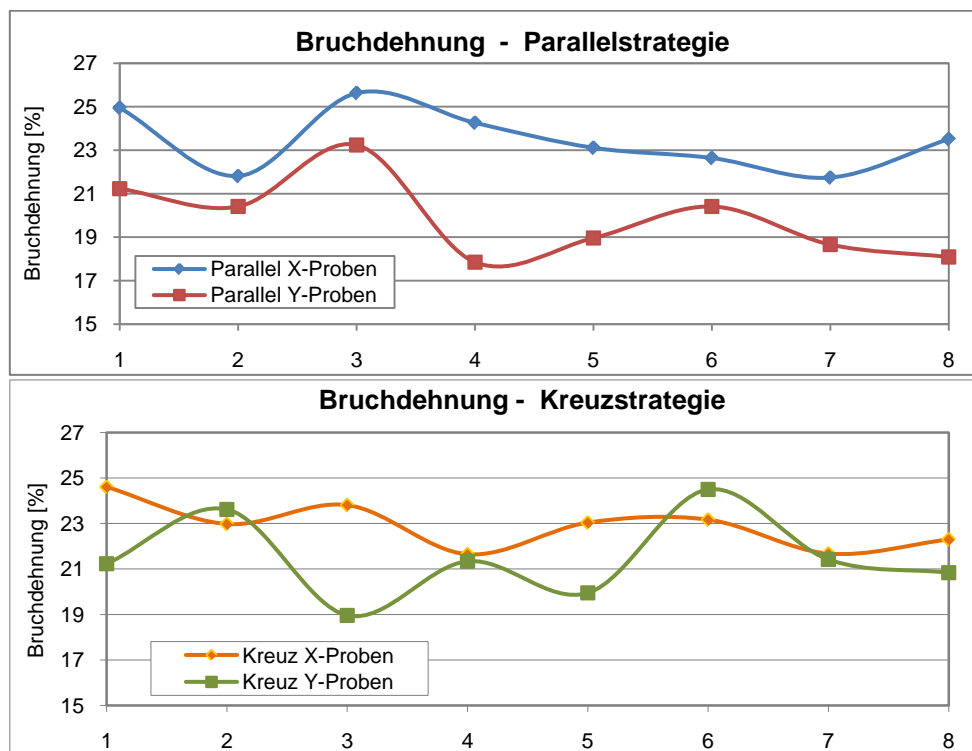


Abbildung 9-2: Bruchdehnung in Abhängigkeit von Scanstrategien

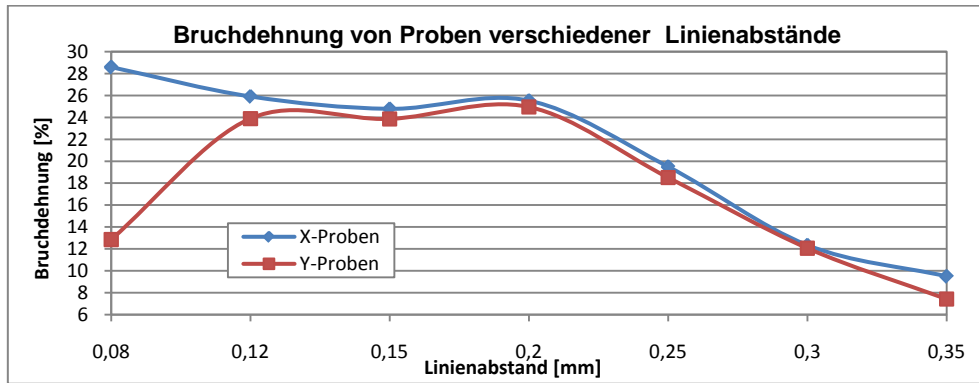
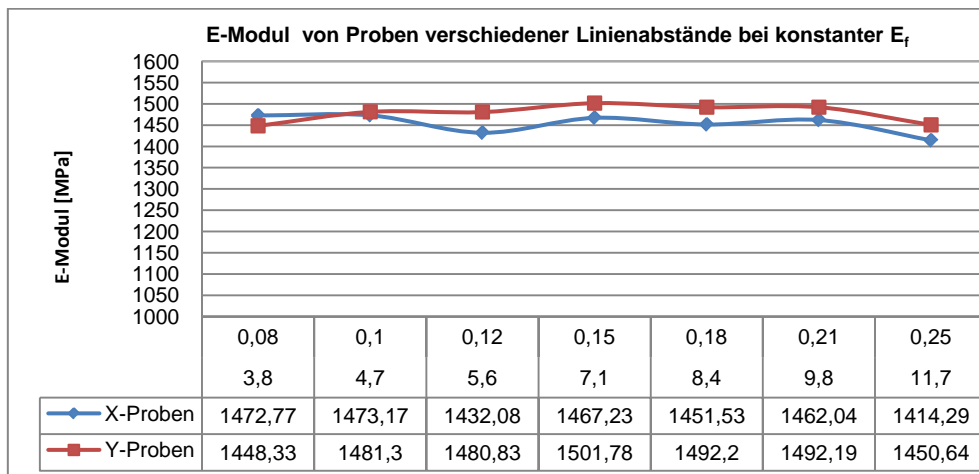
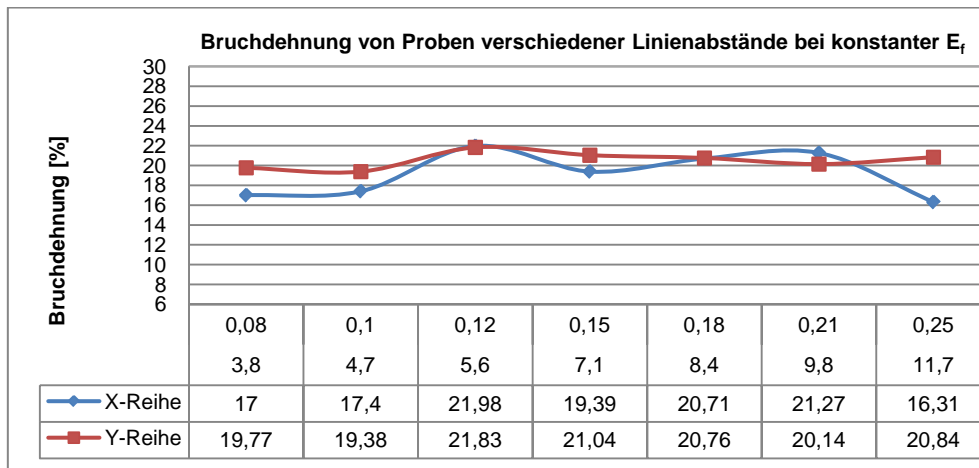
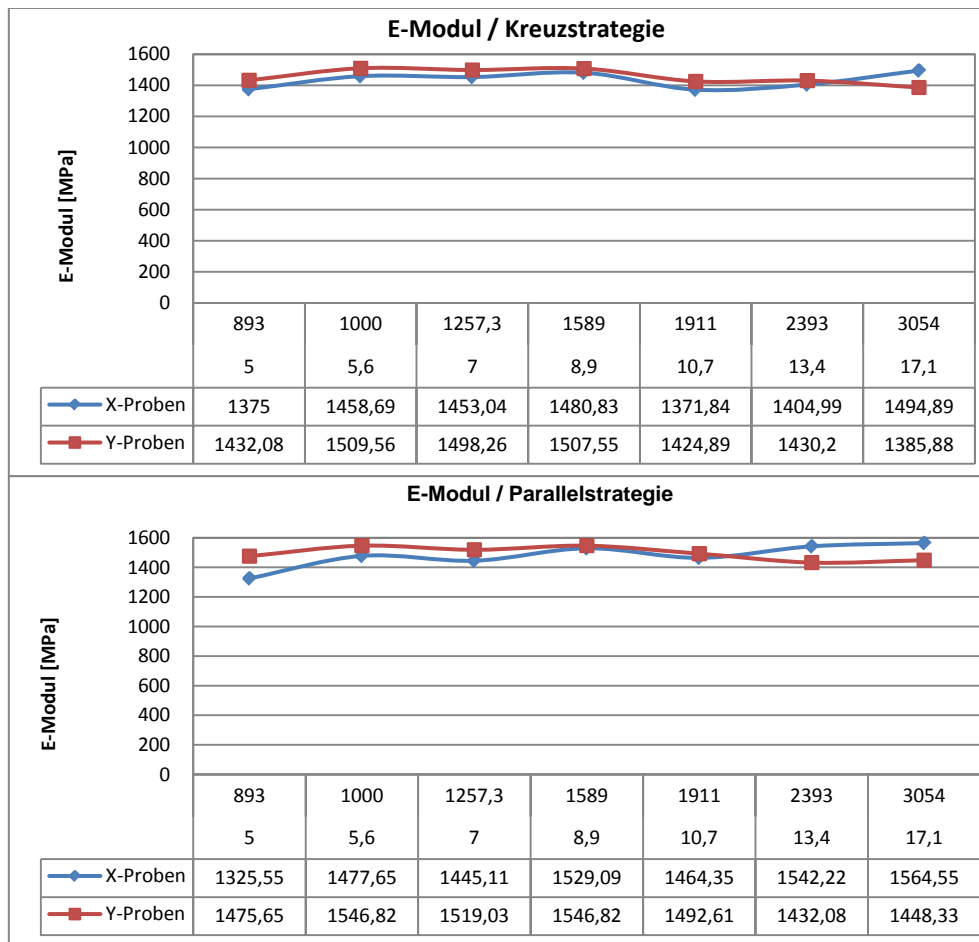
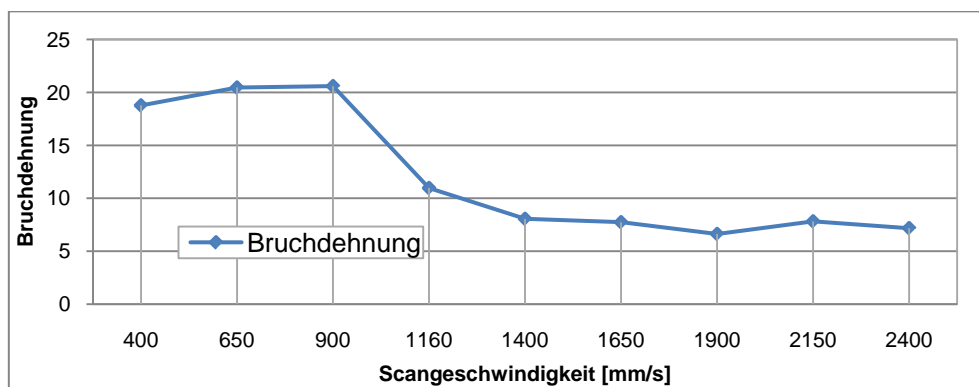


Abbildung 9-3: Bruchdehnung in Abhängigkeit vom Linienabstand

Abbildung 9-4: Elastizität in Abhängigkeit von h_s bei Konstanter E_f Abbildung 9-5: Bruchdehnung in Abhängigkeit vom h_s bei Konstanter E_f

Abbildung 9-6: Elastizität in Abhängigkeit von V_s bei Konstanter E_f Abbildung 9-7: Die Bruchdehnung in Abhängigkeit vom V_s

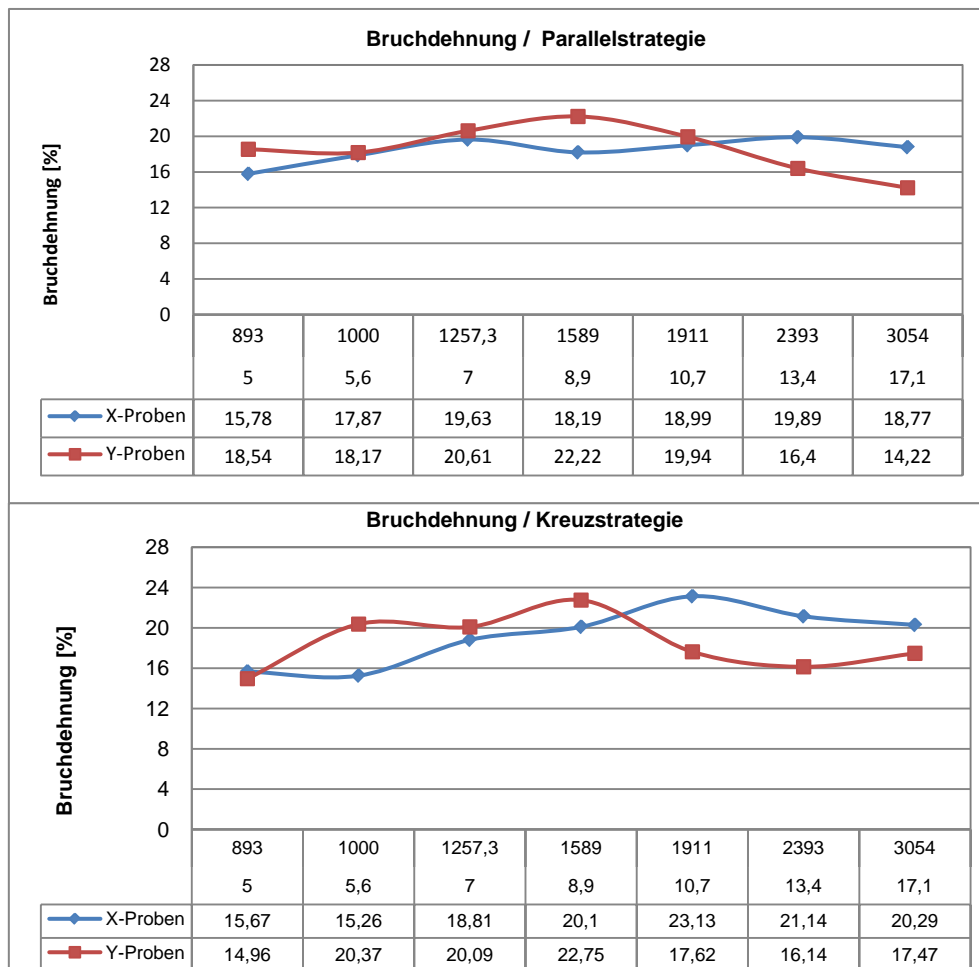


Abbildung 9-8: Bruchdehnung in Abhängigkeit vom V_s bei Konstanter E_f

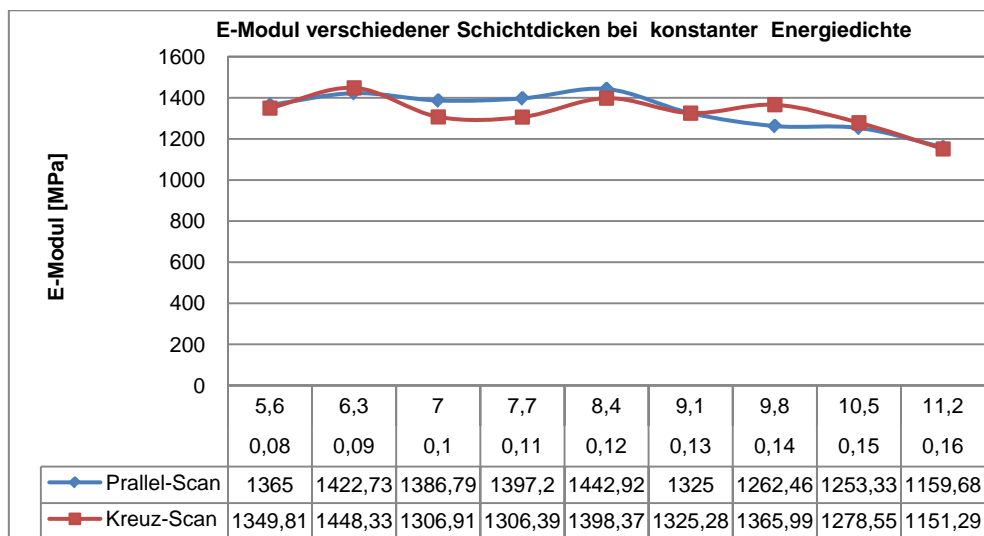


Abbildung 9-9: Elastizität in Abhängigkeit von D_s bei Konstanter E_v

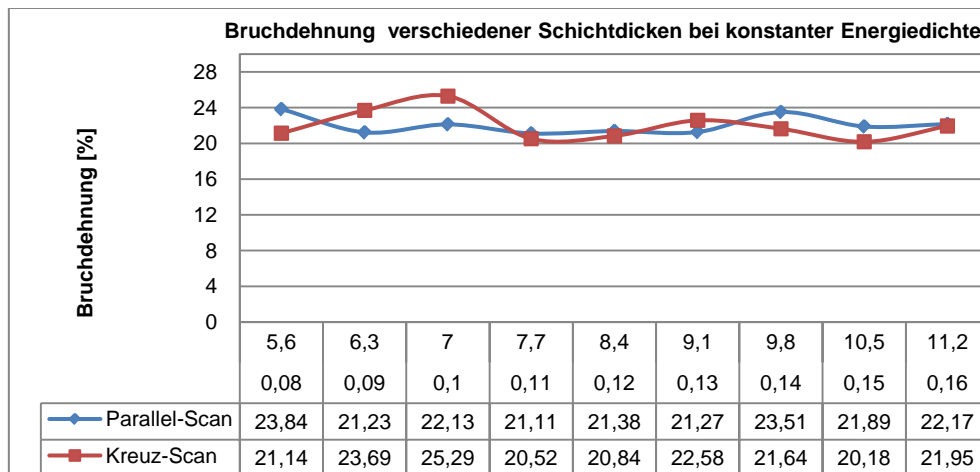


Abbildung 9-10: Bruchdehnung in Abhängigkeit von D_s bei Konstanter E_r

Literaturverzeichnis

- [1]. **Gebhardt, Andreas.** *Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung.* München : Carl Hanser Verlag, 2000. Bde. 1 - Englische Version. ISBN 3-446-21242-6.
- [2]. **Atwood, C.L., et al.** *Integration of rapid prototyping into design and manufacturing.* [Hrsg.] Albuquerque, NM, and Livermore, CA Sandia National Laboratories. United States : Sandia National Laboratories , 1993. SAND--93-0931C; CONF-9305176--1.
- [3]. **Atwood, C.L. und McCarty, Gerald D.** *Integration of rapid prototyping into product development.* [Hrsg.] North-Holland Publishing Co. Amsterdam. NM (USA) : Institution Sandia Natl Lab, Albuquerque, NM, USA, 1994. ISBN:0-444-81850-2.
- [4]. **Pham, D.T. und Dimov, S.S.** *Rapid manufacturing - the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling.* London, United Kingdom : Springer Verlag, Mai 2001. Bde. 35B,5. ISBN: 1-85233-360-X.
- [5]. **Witt, Gerd.** *Moderne Produktionssysteme - Datei-Formate und Datenaufbereitung.* [Vorlesungsskript]. Universität Duisburg-Essen, IPE - Fertigungstechnik : s.n., 2008.
- [6]. **VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), Ausschuss Rapid prototyping.** *VDI 3404.* Düsseldorf : BEUTH VERLAG, 2009. ICS: 25.020.
- [7]. **Wohlers, Terry T.** *Wohlers Report 2008: State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report.* Colorado, USA : Wohlers Associates, Inc., 2008. ISBN: 0-9754429-4-5.
- [8]. **Meindl, Matthias.** *Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing.* München : Utz, Herbert, 2006. ISBN-10: 3831604657.
- [9]. **Zäh, Michael F.** *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien, Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren.* München : Hanser Verlag, 2006. ISBN-10: 3-446-22854-3.
- [10]. **Lindemann, Udo, Reichwald, Ralf und Zäh, Michael F.** *Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion.* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2006. ISBN:10 3-540-25506-0.
- [11]. **Witt, Gerd.** *Fertigungslehre - Einteilung der Hauptgruppe Urformen.* [Vorlesungsskript]. Duisburg : Universität Duisburg-Essen , IPE - Fertigungstechnik, 2009.
- [12]. **Gebhardt, Andreas.** *Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing.* München : Hanser Verlag, 2007. Bd. 3. ISBN: 978-3-446-22666-1.
- [13]. **Burns, Marshall.** *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing.* USA : Prentice Hall, Juli 1993. ISBN-10: 0131194623.
- [14]. **Chua, C. K., Leong, K. F. und Lim, C. S.** *Rapid Prototyping: Principles and Applications.* Singapore : World Scientific Publishing, 2003. Bd. 2nd Edition. ISBN 978-981-238-117-0.

- [15]. **Straßer, G.** Die Prozesskette der Rapid-Technologien. [Online] München, Technische Universität, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 29. 07 2009. http://www.rp-net.de/rapid_prozesskette.htm.
- [16]. **Rehme, O.** *Laser Rapid Manufacturing*. Hamburg : Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), 2005. TUHH – Forschungsbericht. <http://www.tu-harburg.de/forschung/fobe/2005/a1998.5-12/w.76.1075381760071.html>.
- [17]. **Grimm, Todd.** *Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet™: Evaluating and Applying the Right Technology*. Austin, Texas : Accelerated Technologies Inc. (ATI), 2002. <http://www.atirapid.com/>.
- [18]. **Keller, Bernd.** *Rapid Prototyping: Grundlagen zum selektiven Lasersintern von Polymerpulver*. s.l. : Shaker Verlag, 1999. ISBN 3-8265-6554-1.
- [19]. **Eichler, Hans Joachim und Eichler, Jürgen.** *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Berlin : Springer Verlag, 2006. Bd. 6. ISBN: 3-540-30149-6.
- [20]. **TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG.** *Technische Dokumentation: Laserbearbeitung - CO2-Laser*. Ditzingen : s.n., 2007.
- [21]. **Poprawe, Reinhart.** *Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele*. Berlin : Springer Verlag, 2005. ISBN-10: 3540214062.
- [22]. **Greulich, Karl Otto, Monajembashi, S. und Hoyer, C.** *Microbeams and optical tweezers convert the microscope into a versatile microtool*. USA : Microscopy and Analysis, 1997.
- [23]. **Hügel, Helmut.** *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart : Teubner Verlag, 1992. ISBN: 3-519-06134-1.
- [24]. **Weitzel, Robert.** *Maschinen neutrale Prozessdaten Aufbereitung für Schichtenfertigungsverfahren*.
- [25]. **Müller, Norbert.** *Rapidprototyping und Rapidtooling Praktikum*. s.l. : FRITZ-SÜCHTING-INSTITUT FÜR MASCHINENWESEN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT CLAUSTHAL, 2002.
- [26]. **3D Systems GmbH.** *Guide to DuraForm™ Materials*. 2002. ISBN: 8002-10004-001.
- [27]. **Sauer, Andreas.** *Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektive Lasersintern von Thermoplasten*. Duisburg : Shaker Verlag, 2005. ISBN: 3-832-24428-x.
- [28]. **Trenke, D.** *Praktikum. Rapid Prototyping und Rapid Toling*. IMW- Technische Universität Clausthal : s.n., 2002.
- [29]. **C. K. Chua, S. M. Chou and T. S. Wong.** A Study of the State of the Art Rapid Prototyping Technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1998.
- [30]. **Dreher, STefan.** *Flexible Intergration von rapid prototyping Prozessketten in die Produktenstehung*. Berlin : Fraunhofer IRB Verlag, 2005. ISBN: 3-8167-6843-1.

- [31]. **Meiners, Wilhelm.** *Direktes SLS einkomponentiger metallischer Werkstoffe*. Aachen : Shaker Verlag, 1999. ISBN: 3-8265-6571-1.
- [32]. **3D Systems GmbH.** DuraForm_PA_Material. [Online] [Zitat vom: 17. 09 2007.] http://3dsystems.com/german/datafiles/sls/DuraForm_PA_Material.pdf.
- [33]. **Reinhart, Gunther.** „Grundlagen der Rapid Technologien - Rapid Prototyping“. *Material zu den Praxistagen „Rechnerintegrierte Produktion“*. s.l. : Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften TU München, 20. 07 2007. http://www.iwb.tum.de/data/iwb_/studium/Lehrveranstaltungen/Vorlesungen/Rechnerintegrierte_Produktion/SS2005_RIP-Praxistage_RapidPrototyping.pdf.
- [34]. **Gebhardt, Andreas.** *Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung*. München : Carl Hanser Verlag, 2003. Bd. 2. ISBN: 3-446-21242-6.
- [35]. *The Role of Particle Size on the Laser Sintering of Iron Powder.* **Simchi, A.** New York : Springer Sciences; Business Media, 2004, Bde. 35B,5. ISBN: 1073-5615.
- [36]. **3D Systems GmbH.** DuraForm_Flex_plastic. [Online] [Zitat vom: 2007. 09 17.] http://3dsystems.com/german/datafiles/sls/DS-DuraForm_Flex_plastic_German.pdf.
- [37]. —. DuraForm_AF_Material_lowres. [Online] [Zitat vom: 2007. 09 17.] http://3dsystems.com/german/datafiles/sls/DuraForm_AF_Material_lowres.pdf.
- [38]. —. DuraForm_GF_Material. [Online] [Zitat vom: 17. 09 2007.] http://3dsystems.com/german/datafiles/sls/DuraForm_GF_Material.pdf.
- [39]. —. PS_Material_Lowers. [Online] [Zitat vom: 17. 09 2007.] http://3dsystems.com/german/datafiles/sls/CastForm_PS_Material_lowres.pdf.
- [40]. **Bertsche, Bernd und Bullinger, Hans-Jörg.** *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping: Grundlagen, Rahmenbedingungen und Realisierung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2007. ISBN: 978-3-540-69879-1.
- [41]. **Woebcken, Wilbrand.** *Kunststoff-Lexikon*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1998. Bd. 9. ISBN: 3-446-17969-0.
- [42]. **Elsner, Peter und Eyerer, Peter.** *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin Heidelberg : Springer verlag, 2008. Bd. 7. Auflage. ISBN: 978-3-540-72400-1.
- [43]. **Wesam, K. und Witt, G.** *Die Festigkeit in Abhängigkeit von Scanstrategien & -optionen beim Lasersintern vom Kunststoff*. Aachen : RTEjournal, 2010. ISSN: 1614-0923.
- [44]. **Fährer, Jörg.** *Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses*. München : Herbert Utz Verlag, 2002. ISBN-10: 3-8316-0124-0.
- [45]. **Norm DIN EN ISO 527-1.** *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, April 1996.
- [46]. **Hellerich, Walter.** *Werkstoff- Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*. München : Hanser Verlag, 2004. Bd. 9. Auflage. ISBN: 3446214372.

- [47]. **Nöken, Stefan.** *Technologie des Selektiven Lasersinterns von Thermoplasten.* s.l. : Shaker Verlag, 1997. ISBN-10: 3826524837.
- [48]. **Norm DIN EN ISO 11145.** Optik und Photonik - Laser und Laseranlagen - Begriffe und Formelzeichen. November 2008. Bd. Deutsche Fassung.
- [49]. **Norm DIN 4760.** Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1982.
- [50]. **Weingraber, Herbert und Abou-Aly, Mohamed.** *Handbuch Technische Oberflächen. Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten.* Braunschweig : Vieweg+Teubner, 1989. Bd. 1. Aufl. ISBN-10: 3528063181.
- [51]. **Sorg, Horst.** *Praxis der Rauheitsmessung und Oberflächenbeurteilung.* München ; Wien : Hanser, 1995. ISBN: 3-446-17528-8.
- [52]. **Bley, Helmut und Bossmann, Marc.** Skript zum Fachpraktikum "Oberflächenmesstechnik". Universität des Saarlandes : Lehrstuhl für Fertigungstechnik (CAM), 2003.
- [53]. **Norm DIN EN ISO 4288.** Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin : Beuth Verlag GmbH, April 1998.
- [54]. **NORM DIN 8580.** *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, September 2003.
- [55]. **Kerspe, Jobst H.** *Aufgaben und Verfahren in der Oberflächenbehandlung.* Renningen : Expert Verlag, 2000. ISBN-10: 3816916473.
- [56]. **Müller, K.P.** *Praktische Oberflächentechnik: Vorbehandeln – Beschichten – Beschichtungsfehler – Umweltschutz.* Wiesbaden : Vieweg, 2003. Bd. 4. überarb. Aufl. ISBN: 3-528-36562-5.
- [57]. **NORM DIN 8200.** Strahlverfahrenstechnik: Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Oktober 1982.
- [58]. **Klocke, F. und König, W.** *Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen.* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2005. Bd. 4. neu bearb. Aufl. ISBN-10: 3-540-23496-9.
- [59]. **Bohnet, Jens und Bernhardt, Greta.** *Bessere Oberflächen auf Rapid-Prototyping Werkstücke, In Galvanotechnik.* Leutze : Bad Saulgau, 2008. ISBN: 1884-1891.
- [60]. **Norm DIN 8589-3.** Fertigungsverfahren Spanen: Teil 3 Fräsen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin : Beuth Verlag GmbH, September 2003.
- [61]. **Böge, Alfred.** *Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Kapitel 4: Fräsen.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2007. Bd. 18. überarbeitete und erweiterte Auflage. ISBN: 9783834890924.
- [62]. **Pauksch, Eberhard et al.** *Zerspantechnik_ Prozesse, Werkzeuge, Technologien.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2008. Bd. 12. vollst. überarb. u. erw. Aufl. ISBN: 978-3-8348-0279-8.

- [63]. **Prüller, Helmut, Berger, Klaus und P. Thilo, Alfred.** *Grundlagen der Gleitschleiftechnik. In: Entgrat-Technik: Entwicklungsstand und Problemlösungen.* Ehningen : Expert Verlag, 2005. Bd. 2. überarb. Aufl. ISBN: 9783816928317.
- [64]. **NORM DIN 8589-17.** *Fertigungsverfahren Spanen: Teil 17: Gleitspanen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, September 2003.
- [65]. **Siemers, Ulrich.** *Einführung abfall- und abwasserarmer Gleitschleiftechniken in die Fertigung. In: Tagungsband Gleitschleiftechnik.* Fellbach : s.n., 1997.
- [66]. **Giesler, Sven.** *Technische Verfahrensoptimierung und Einsparung von Hilfsstoffen beim Gleitschleifen. In: Tagungsband Gleitschleiftechniken.* Stuttgart : s.n., 1997.
- [67]. Otec Präzisionsfinish GmbH. *Datenblatt Schleifkörper; Information Gleitschleifen.* [Online] 25. 03 2009. <http://www.otec.de>.
- [68]. Rösler Oberflächen-technik GmbH. *Information Gleitschleifen.* [Online] 25. 03 2009. <http://www.rosler.com>.
- [69]. **Walther Trowal GmbH & Co. KG.** *Datenblatt Schleifkörper.* [Online] 25. 03 2009. <http://www.walther-trowal.de>.
- [70]. **Trenke, Detlef.** *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal - Infiltration von lasergesinterten Bauteilen.* [Hrsg.] Peter Dietz. TU Clausthal : s.n., 2000. Bde. IMW - Institutsmitteilung Nr. 25. ISSN: 0947-2274.
- [71]. **Thomer, K.W. und Ondratschek, D.** *Lackieren. In: Handbuch der Fertigungstechnik Bd. 4/1: Abtragen, Beschichten.* [Hrsg.] Günter Spur. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1987. ISBN: 3446125353.
- [72]. **Suchentrunk, R.** *Handbuch für Theorie und Praxis: Kunststoff-Metallisierung.* Bad Saulgau : Leuze Verlag, 2006. Bd. 3. Aufl. ISBN: 3-87480-081-4.
- [73]. **Eyerer, P., Elsner, P. und Hirth, Th.** *Polymer Engineering: Technologien und Praxis.* [Hrsg.] Springer. Heidelberg : Springer Verlag, 2007. ISBN: 978-3-540-72402-5.
- [74]. *Slicing procedures in layered manufacturing: a review.* **Pandey, P.M., Reddy, N.V. und Dhande, S.G.** Kanpur, Indien : MCB UP Ltd, 2004. ISSN: 1355-2546.
- [75]. **VDI.** *VDI-Wärmeatlas.* Berlin : Springer Verlag, 2006. ISBN-10: 3-540-25504-4.

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.